



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ANALÝZA DYNAMIKY A VÝROBA PROTOTYPU  
GAUSSOVY PUŠKY**

DYNAMIC ANALYSIS AND PROTOTYPING OF COILGUN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Militký

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Rubeš

BRNO 2020

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Ondřej Militký**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Mechatronika  
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Rubeš**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Analýza dynamiky a výroba prototypu Gaussovy pušky**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Úkolem práce je popsat princip Gaussovy pušky, provést rešerši existujících řešení a popsat vhodné využití. Gaussova puška je typickým mechatronickým systémem, ve kterém hraje podstatnou roli jak technická mechanika, tak výkonová elektrotechnika. Je tedy vhodným předmětem zájmu pro studenta mechatroniky a pro jeho zdokonalení v oboru strojním i elektrotechnickém. Zvláštní důraz by v práci měl být kladen na využití, neboť jakožto palná zbraň patří do skupiny kontroverzních technických zařízení.

### **Cíle bakalářské práce:**

1. Popis principu Gaussovy pušky a rešerše existujících řešení
2. Tvorba modelu dynamiky projektilu v Gaussově pušce
3. Výroba prototypu a srovnání s modelem

### **Seznam doporučené literatury:**

KRATOCHVÍL, Ctirad a Jaromír SLAVÍK. Mechanika těles: dynamika. Vyd. 4., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3446-2.

PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2743-4.

PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIU, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá popisem principu Gaussovy pušky. Je zde popsán fyzikální princip, na kterém zařízení funguje, provedení konstrukce a její výhody a omezení. Dále je vytvořen výpočtový model v prostředí Matlab Simulink, který simuluje chování projektilu během výstřelu. Na základě tohoto modelu je navržen a zkonstruován prototyp Gaussovy pušky. Prototyp je následně testován a porovnáván s výpočtovým modelem pro určení celkové účinnosti vytvořené pušky.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetické dělo, Gaussova puška, coilgun, magnetismus, elektromagnetická indukce, solenoid, magnetické pole solenoidu, Simulink

## **Abstract**

This thesis deals with the description of the Gaussian rifle principle. It describes the physical principle, on which the device works, the design of the structure and its advantages and limitations. Furthermore, a computational model is created in the Matlab Simulink environment, which simulates the behavior of a projectile during a shot. Based on this model, a prototype Gaussian rifle is designed and constructed. The prototype is then tested and compared with a computational model to determine the overall effectiveness of the created rifle.

## **Key words**

Electromagnetic gun, Gauss rifle, coilgun, magnetism, electromagnetic induction, solenoid, solenoid magnetic field

## **Bibliografická citace:**

MILITKÝ, Ondřej. *Analýza dynamiky a výroba prototypu Gaussovy pušky*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121633>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. 57 s. Vedoucí práce Ondřej Rubeš.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně.  
Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 20. června 2020

.....  
*podpis autora*

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Rubešovi za odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	<b>Elektromagnetické zbraně</b> .....	2
2.1	Kolejnicové dělo .....	2
2.1.1	Princip.....	2
2.2	Gaussova puška.....	3
2.2.1	Princip.....	3
2.2.2	Historie a vývoj .....	5
2.2.3	Experimentální elektromagnetické vystřelovací zařízení s více stupni .....	7
2.2.4	Elektromagnetické výkonové aktuátory .....	7
2.2.5	Gauss Machine Gun .....	8
3	<b>Fyzikální podstata funkce zbraně</b> .....	9
3.1	Energie magnetického pole.....	9
3.1.1	Magnetická indukce.....	9
3.1.2	Magnetické pole elektrického proudu .....	10
3.1.3	Magnetické pole solenoidu .....	11
3.1.4	Magnetický indukční tok .....	12
3.1.5	Indukčnost solenoidu .....	13
3.1.6	Vlastní indukce .....	15
3.1.7	Cívka v elektrickém obvodu.....	16
3.1.8	Energie magnetického pole .....	17
3.1.9	Síla solenoidu .....	18
3.2	Energetické ztráty .....	18
3.2.1	Ztráty vířivými proudy .....	18
3.2.2	Hysterezní ztráty.....	19
3.2.3	Ztráty třením .....	20
3.2.4	Ztráty vyvolané odporem prostředí .....	21
4	<b>Dynamika projektilu a simulace</b> .....	22
4.1	Pohyb projektilu v hlavni.....	22
4.2	Pohyb projektilu v prostředí .....	23
4.3	Simulace pohybu projektilu v hlavni .....	24
4.4	Simulace trajektorie .....	26
5	<b>Návrh a výroba prototypu</b> .....	27
5.1	Projektil.....	27
5.2	Cívka .....	29
5.2.1	Závislost $dL/dx$ .....	29
5.2.2	Závislost indukčnosti na poloze jádra .....	30
5.2.3	Závislost síly na poloze jádra .....	32
5.2.4	Porovnání obou metod.....	34
5.2.5	Stanovení počtu cívek.....	35
5.3	Hlaveň.....	35
5.3.1	Materiál.....	36
5.3.2	Rozměry .....	36



5.4	Detekce projektilu .....	36
5.5	Řízení .....	37
5.6	Tranzistory a budiče.....	38
5.7	Akumulátor .....	38
5.8	Podávací systém.....	39
5.9	Tělo zbraně .....	40
<b>6</b>	<b>Porovnání výpočtového modelu a prototypu .....</b>	<b>41</b>
6.1	Měření proudu.....	41
6.2	Měření rychlosti projektilu .....	42
6.3	Srovnání .....	43
6.4	Stanovení účinnosti.....	45
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>47</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>49</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Princip kolejnicového děla [2] .....	2
Obrázek 2.2: Mechanismus a) před výstřelem, b) po výstřelu .....	3
Obrázek 2.3: Princip Gaussovi pušky .....	4
Obrázek 2.4: Schéma zbraně zahrnuté v Birkelandově patentu [4] .....	5
Obrázek 2.5: Schéma zbraně zahrnuté v Rigsbyho patentu [6] .....	6
Obrázek 2.6: Gauss Machine Gun, konstrukce Jason Murray [9] .....	8
Obrázek 3.1: Určení směru Lorentzovi síly [10] .....	10
Obrázek 3.2: Magnetické pole elektrického proudu [10] .....	10
Obrázek 3.3: Magnetické pole solenoidu [10] .....	11
Obrázek 3.4: Ampérova křivka [10] .....	12
Obrázek 3.5: a) náhodně uspořádané domény, .....	14
Obrázek 3.6: RL obvod .....	16
Obrázek 3.7: Hysterezní křivka [10] .....	19
Obrázek 3.8: Určení třetího koeficientu náboje v hlavni .....	20
Obrázek 4.1: Trajektorie střely .....	23
Obrázek 4.2: Schéma programu pro dvě cívky .....	24
Obrázek 4.3: Subsystém .....	25
Obrázek 4.4: Enabled subsystem obsahující rovnici 3.31 .....	25
Obrázek 4.5: Schéma modelu pro výpočet trajektorie .....	26
Obrázek 5.1: Zkušební projektily .....	28
Obrázek 5.2: Trajektorie pro vybrané činitele odporu .....	28
Obrázek 5.3: Závislost indukčnosti na poloze jádra .....	30
Obrázek 5.4: Závislost derivace indukčnosti na poloze jádra .....	31
Obrázek 5.5: Měření síly solenoidu .....	32
Obrázek 5.6: Závislost derivace indukčnosti na poloze jádra .....	33
Obrázek 5.7: Porovnání obou metod .....	34
Obrázek 5.8: Simulovaný průběh rychlosti pro osm cívek .....	35
Obrázek 5.9: Projektil vstupující do IR brány .....	36
Obrázek 5.10: Příklad zapojení arduina .....	37
Obrázek 5.11: Podávací mechanismus se zásobníkem .....	39
Obrázek 6.1: Průběh proudu .....	41
Obrázek 6.2: Srovnání teoretického a skutečného průběhu rychlostí .....	43
Obrázek 6.3: Srovnání simulovaných a skutečných trajektorií .....	44

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Relativní permeability některých materiálů [11] .....	15
Tabulka 3.2: Činitele odporu pro některé tvary těles [13] [14] .....	21
Tabulka 6.1: Skutečná rychlost v závislosti na počtu cívek .....	42
Tabulka 6.2: Dostřel při různých úhlech náměru .....	44
Tabulka 6.3: Stanovení účinnosti .....	45

# 1 Úvod

Elektromagnetické zbraně představují zajímavou alternativu k nynějším konvenčním palným zbraním. Ty využívají ke své funkci střelný prach, jenž se vznítí a hořící plyny vytlačí projektil z hlavně ven. Rychlost, s jakou se plyny rozpínají, je však limitována a to rychlostí zvuku. Elektromagnetické zbraně, které využívají k urychlení projektilu sílu magnetického pole, však takto limitovány nejsou. Projektil může dosáhnout násobně vyšších rychlostí.

Idea elektromagnetické zbraně pochází již z počátků 20. století, kdy se kvůli probíhajícím válkám hledala řešení, umožňující úsporu nákladů na jejich provoz. Limitujícím faktorem byla jejich energetická náročnost a nedokonalost dobových elektrických součástek. V současné době jsou již dostupné dostatečně výkonné a kompaktní zdroje energie a moderní polovodičové spínací prvky. Éra elektromagnetických zbraní tak možná nastává právě teď.

Tato práce se bude zabývat popisem, návrhem a konstrukcí Gaussovy pušky. V první části bude rozebrán fyzikální princip funkce pušky a jednotlivých komponent. Návrh bude obsahovat výpočtový model, popisující chování projektilu během a po výstřelu. Při konstrukci bude třeba uplatnit znalosti z oboru strojírenství, elektrotechniky a informačních technologií. Výpočtový a skutečný model se poté porovnájí. Z výsledků bude možné určit účinnost sestavené zkušební zbraně.

## 2 Elektromagnetické zbraně

### 2.1 Kolejnicové dělo

Kolejnicové dělo neboli Railgun byl poprvé prezentován během 1. světové války ve Francii. Po konci války byl další vývoj těchto zbraní zastaven.

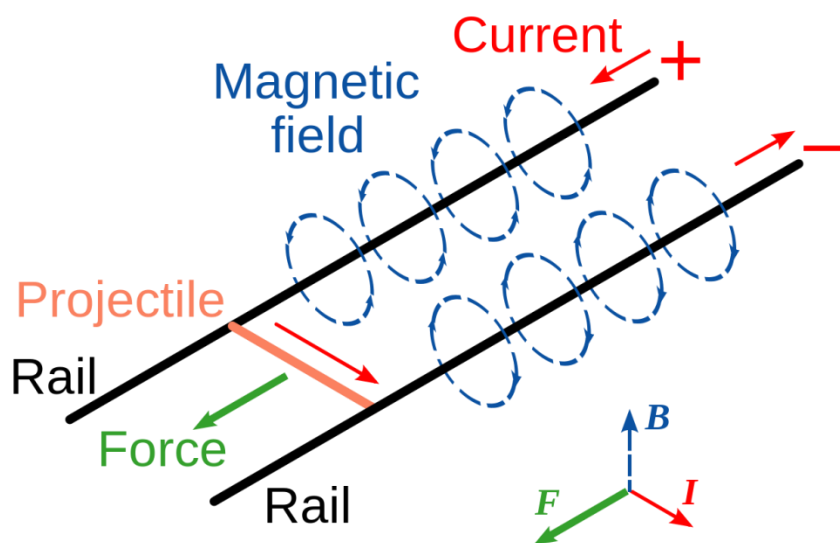
Ke konceptu Railgunu se vrátilo během 2. světové války Německo. Ve snaze zastavit nálety na své území se pokoušelo vyvinout protiletadlový kanón. Vznikly tak plány na stavbu zbraně, která měla vystřelovat 0,5kg vážící projektily rychlostí 2000m/s. Kvůli konci války zbraň nebyla postavena.

Roku 1993 zahájila americká a britská vláda společný projekt, zabývající se vývojem a testováním děla pro použití na palubách lodí. Vývoj vyvrcholil roku 2010 zkouškou, při níž byl 3,2 kg projektil vystřelen rychlostí 3 390 m/s.

V současné době se vývojáři soustředí především na prodloužení životnosti hlavní a na vývoj dostatečně výkonných zdrojů elektrické energie. S jejich nasazením se počítá na palubách lodí. [1]

#### 2.1.1 Princip

Hlaveň se skládá ze dvou kolejnic, kterými prochází elektrický proud. Kolejnice zároveň vedou a usměrňují projektil. Pokud se projektil, přes který prochází elektrický proud, pohybuje v magnetickém poli, působí na něj Lorenzova síla, která jej urychluje. Projektil musí být vodivý nebo uzavřený ve vodivé schránce. Další možností je, že se obvod uzavře přes vodivý plyn, který se přemění na rozpínající se plazmu a vytlačí projektil z hlavní. [1]



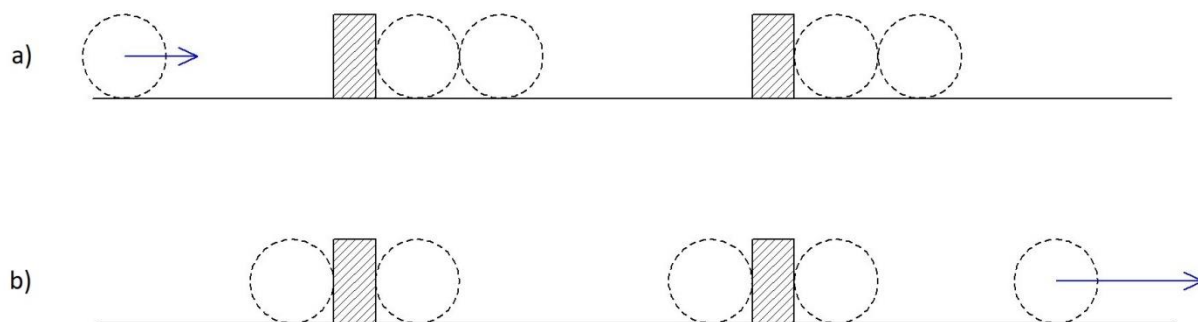
Obrázek 2.1: Princip kolejnicového děla [2]

## 2.2 Gaussova puška

Gaussova puška neboli Gaussgun nese název po německém matematikovi a fyzikovi Carlu Friedrichu Gaussovi, který popsal magnetický efekt, na jehož základě tyto zbraně fungují. [3]

### 2.2.1 Princip

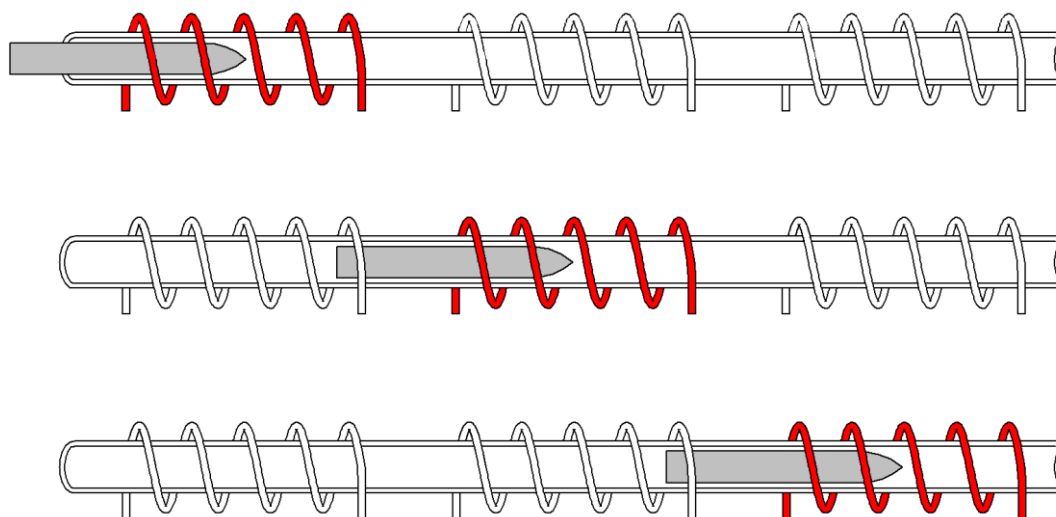
Nejjednodušší mechanismus využívá silné magnety a kovové koule. Každá sekce obsahuje jeden magnet a dvě kovové koule. Tyto sekce jsou umístěny v libovolném množství několik centimetrů od sebe. Do prvního magnetu v řadě se nechá narazit kovová koule. Čím blíže je koule magnetu, tím se její rychlost zvyšuje. Při nárazu do magnetu dojde k přenosu hybnosti přes magnet a první kouli na druhou kouli v řadě. Ta se uvolní a celý postup se opakuje. Kouli z poslední sekce je udělena nejvyšší rychlost. [3]



Obrázek 2.2: Mechanismus a) před výstřelem, b) po výstřelu

Složitější mechanismus využívá energii magnetického pole cívek. Konstrukce vychází z lineárního elektromotoru. Zbraň tvoří jedna nebo více cívek uspořádaných v jedné ose a obklopujících hlaveň. Cívky jsou napájeny tak, aby vtáhly feromagnetický či vodivý projektil. Když projektil cívku opouští, musí být napájení přerušeno, aby nedošlo ke zpětnému vtažení projektilu do cívky. Kvůli snazšímu ovládání je projektil většinou stejně dlouhý jako odpalovací cívka. Lze tak spolehlivě určit, kdy má být napájení vypnuto. Pro detekci projektilu se nejčastěji používá mechanický kontakt nebo optický senzor. Lze také předřadit menší cívku, která bude fungovat podobně jako detektor kovů. Zdroj elektrické energie musí být schopen poskytnout pulzně vysoké hodnoty proudu. Pro tyto účely jsou nejvhodnější kondenzátory, nebo vysokoproudové akumulátory. Princip funkce je znázorněn na obrázku 3.

Tento mechanismus umožňuje udělit projektilu značnou rychlost. Ve srovnání s Railgunem dosahuje vyšší účinnosti a ve většině případů nevyžaduje posuvný kontakt pro přenos energie na projektil. Obecně platí, že s počtem cívek, které zbraň obsahuje, její účinnost roste. Celkový výkon zbraně je však stále omezen možnostmi současných elektronických komponent, zejména zdrojů energie a vodičů s relativně vysokým odporem, které zapříčiňují vznik velkého množství odpadního tepla. K výraznějšímu zlepšení výkonu a účinnosti by mohl přispět pokrok v oblasti supravodičů. [3]

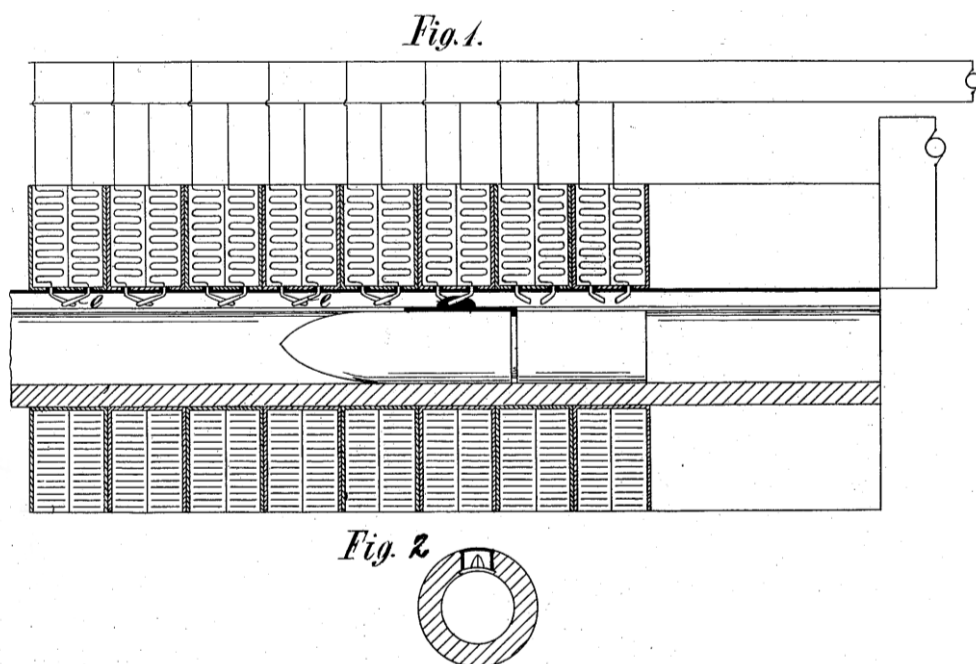


Obrázek 2.3: Princip Gaussovi pušky

## 2.2.2 Historie a vývoj

První prototyp byl sestaven a patentován Norským vědcem Kristianem Birkelandem roku 1904. Zbraň se skládala z hlavně opatřené drážkou, kterou obklopovalo několik solenoidů. Spínání solenoidů bylo zajištěno mechanickými kontakty, které byly umístěny v drážce hlavně. Ve výchozím stavu byly tyto kontakty sepnuty. Po přivedení elektrického proudu se dal projektil do pohybu a postupně rozpínal kontakty v drážce. Maximální dosažitelná rychlost projektilu činila 100m/s. Jako zdroj energie sloužilo dynamo. [4]

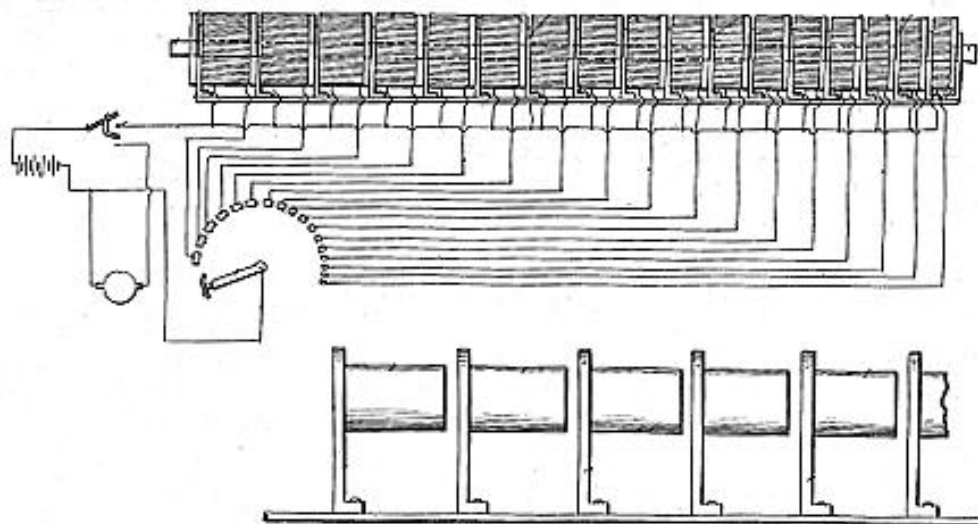
Demonstrace prototypu před publikem však skončila neúspěchem. Uvnitř děla došlo k explozi způsobené zkratem, při němž proud přesahoval 10kA. To odradilo všechny potenciální zájemce. I přes jeho snahy o další vývoj a vylepšení se úspěch nedostavil. [5]



Obrázek 2.4: Schéma zbraně zahrnuté v Birkelandově patentu [4]

V roce 1933 byl Americkým vynálezcem Virgilem Rigsbym zkonstruován elektromagnetický kulomet. Hlavním účelem této zbraně měla být obrana proti letadlům. Díky absenci záblesků a kouře při výstřelech by byla jejich pozice těžko odhalitelná. Kadence činila 150 ran za minutu.

Podél hlavně je uspořádáno větší množství cívek, přičemž každá následující cívka je užší než ta předchozí. Spínání cívek je řešeno velice důmyslně pomocí otočného spínače. Plocha kontaktů spínače se také zmenšuje v závislosti na umístění ovládané cívky. Po stisku spouště začne elektromotor otáčet spínačem. Rychlost otáčení, a tím i spínání, musí být synchronní s pohybem projektilu. Schéma mechanismu je na obrázku 2.5. [6]



Obrázek 2.5: Schéma zbraně zahrnuté v Rigsbyho patentu [6]

Největší nevýhodou uvedeného řešení byla vysoká energetická náročnost a také značné ztráty energie na kontaktech mechanického spínače, jež se rychle opotřebily. Ani toto řešení tak nemohlo konkurovat konvenčním palným zbraním a nebylo komerčně úspěšné.

K většímu rozmachu obdobných zařízení mohlo dojít až s příchodem polovodičových součástek, které umožnily přesné řízení a nahradily mechanické spínací prvky. V současné době je vývoj těchto zbraní spíše v rukou technických nadšenců než zájemců o zbraně a jejich využití.

Vybrané projekty jsou popsány v následujících podkapitolách.



### **2.2.3 Experimentální elektromagnetické vystřelovací zařízení s více stupni**

Autor Ing. Martin Kovařík se ve své práci zabývá analýzou elektromagnetického vystřelovacího systému za účelem dosažení maximální možné účinnosti. Součástí je simulace, popisující magnetický jev, ke kterému dochází během výstřelu. Dále je zde podrobně popsán návrh a výroba potřebných komponent.

Pro demonstraci byl vytvořen model, obsahující čtyři vystřelovací cívky napájené pomocí kondenzátorů. Dále byly navrženy řídicí obvody a nabíječka kondenzátorů. K detekci projektilu jsou použity optické brány.

Při zkouškách dokázala zbraň vyslat projektil rychlostí 41,25m/s a udělit mu kinetickou energii 22J. Celková účinnost zařízení se pohybovala kolem 22,7%. Takováto účinnost je pro daný mechanismu velmi dobrá. [7]

### **2.2.4 Elektromagnetické výkonové aktuátory**

Autorkou zmíněné práce je Ing. Lucie Kadlecová. Jsou zde detailně popsány principy funkcí všech elektromagnetických vystřelovacích zařízení. Dále je tu popsán návrh indukčního coilgunu. Toto zařízení používá, místo běžnějšího feromagnetického projektilu, měděný či hliníkový projektil tvaru prstence. V prstenci se při průchodu cívkou indukuje elektrický proud, který vytváří vlastní magnetické pole. Práce také obsahuje simulace, predikující chování zbraně při výstřelu.

Konstrukce se skládá z jedné dvouvrstvé odpalovací cívky, dvou baterií elektrolytických kondenzátorů zapojených antisériově před a za cívkou a tyristoru s budičem.

Nejlepších výsledků bylo při zkouškách dosaženo s duralovou trubicí o délce poloviny odpalovací cívky. Maximální rychlost, které projektil dosáhl, byla 29,4m/s. Kinetická energie, udělená projektilu, činila 8,64J. [8]

## 2.2.5 Gauss Machine Gun

Tvůrcem projektu je Američan Jason Murray. Ten se zabýval návrhem přenosné Gaussovy pušky, která měla být schopna střílet projektily dávkou, tedy ihned po sobě. Zbraň obsahovala osm cívek. K detekci projektilu byly využity optické brány. Spouštění cívek zajišťovaly výkonné IGBT tranzistory a jako zdroj energie sloužily vysokoproudé Lithium-polymerové akumulátory. Náboje byly umístěny v jednořadém schránkovém zásobníku s kapacitou 15 kusů. O posuv k hlavní se staral solenoid s jádrem, který byl opatřený háčkem pro zachycení konce náboje.

Výsledná zbraň dosahuje úst'ové rychlosti 42m/s, kinetická energie střely je 10,78J a kadence činí 7,7 výstřelů za vteřinu. Podle těchto vlastností se jedná o jedno z nejvýkonnějších zařízení uvedeného typu. Zbraň je zobrazena na obrázku 2.6. [9]



Obrázek 2.6: Gauss Machine Gun, konstrukce Jason Murray [9]

Po úspěchu svého experimentálního projektu založil Murray společnost Arcflash Labs a vyrábí upravenou verzi zbraně sériově. V současné době je to jediný výrobce, který prodává taková kompletně zhotovená zařízení.

## 3 Fyzikální podstata funkce zbraně

V této kapitole je popsáno, jak zbraň z fyzikálního hlediska funguje. Pro potřeby tvorby simulačního modelu je důležité určit, jak působí magnetické pole na projektil a popsat jeho silové účinky, aby byl výsledek simulace co možná nejméně nejvšednější. Dále je důležité popsat, kde dochází ke ztrátám energie, aby mohla být učiněna opatření pro jejich eliminaci. Výsledky budou využity při tvorbě prototypu.

### 3.1 Energie magnetického pole

Aby bylo možné simulovat chování projektilu při výstřelu, je nutné objasnit, jakým způsobem dochází k transformaci energie elektromagnetického pole na kinetickou energii střely. Princip těchto dějů je popsán v podkapitole 3.1.

#### 3.1.1 Magnetická indukce

Jedná se o fyzikální veličinu, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem. Je popsána vektorem  $\vec{B}$  a jednotkou je Tesla. K jejímu určení je třeba zavedení magnetické síly  $\vec{F}_B$  působící na elektricky nabitou částici.

Magnetická indukce je definována jako vektor, který má takový směr, ve kterém na částici pohybující se rychlostí  $\vec{v}$  působí magnetická síla  $F_B = 0$ . Pro rychlost  $\vec{v}$  kolmou k  $\vec{v}_{F_B=0}$  na částici působí největší síla  $F_{B,max}$ . Velikost magnetické indukce  $B$  je definována vztahem

$$B = \frac{F_{B,max}}{|Q|v}, \quad (3.1)$$

kde  $Q$  je náboj částice.

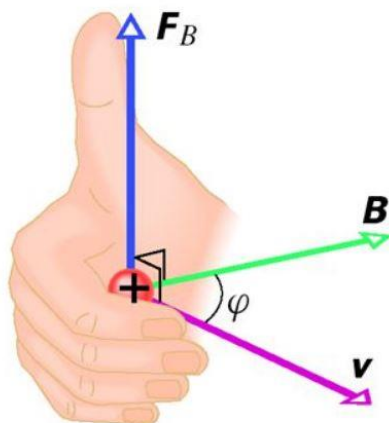
Síla  $\vec{F}_B$  se nazývá Lorentzova síla a platí

$$\vec{F}_B = Q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (3.2)$$

Pro určení velikosti vektorového součinu lze přepsat do tvaru

$$F_B = |Q|vB \sin \varphi, \quad (3.3)$$

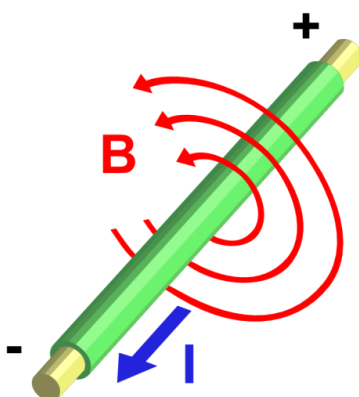
kde  $\varphi$  je úhel mezi směrem rychlosti  $\vec{v}$  a magnetické indukce  $\vec{B}$ . [10]



Obrázek 3.1: Určení směru Lorentzovy síly [10]

### 3.1.2 Magnetické pole elektrického proudu

Každá pohybující se nabitá částice kolem sebe vytváří magnetické pole. Totéž platí i pro proud nabitých částic.



Obrázek 3.2: Magnetické pole elektrického proudu [10]

Pro magnetickou indukci platí princip superpozice. Výsledné magnetické pole je rovno součtu polí dílčích. Magnetická indukce v určitém bodě se tedy vypočítá integrací příspěvků  $d\vec{B}$  od všech proudových elementů. Velikost jednotlivých příspěvků je možno určit pomocí Biotova–Savartova zákona

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}^0}{r^2}, \quad (3.4)$$

kde  $Id\vec{s}$  je proudový délkový element,  $\vec{r}^0$  je jednotkový vektor směřující od proudového elementu k vyšetřovanému bodu a konstanta  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ ).

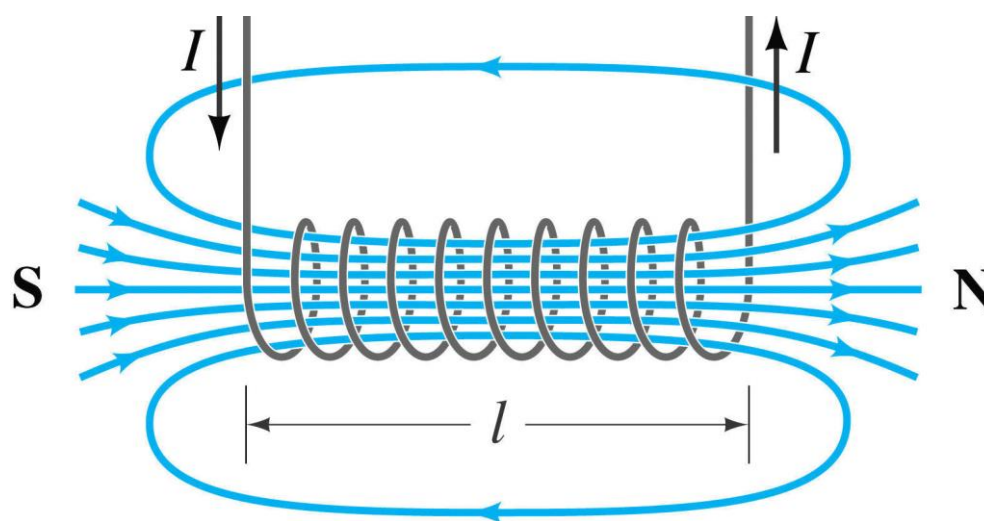
Pokud bude mít magnetické pole libovolně rozložených elektrických proudů jistou symetrii, můžeme být s výhodou využito Ampérova zákona. Tento zákon je ekvivalentní Biotovu – Savartovu zákonu a má tvar

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_c. \quad (3.5)$$

Tvar integrálu naznačuje integraci po uzavřené orientované křivce. Její infinitezimální element se značí  $d\vec{s}$  a leží tečně ke křivce. Proud  $I_c$  je celkový proud daný součtem všech proudů obepnutých křivkou. [10]

### 3.1.3 Magnetické pole solenoidu

Dlouhá hustě vinutá cívka se nazývá solenoid. Magnetické pole solenoidu je dáno superpozicí polí vytvořených jednotlivými závity.

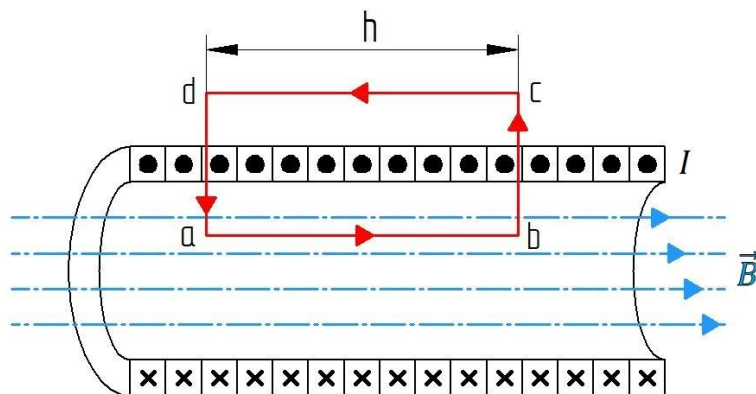


Obrázek 3.3: Magnetické pole solenoidu [10]

Magnetické pole uvnitř solenoidu je téměř homogenní a magnetická indukce rovnoběžná s osou solenoidu. Směr magnetické indukce je dán směrem elektrického proudu a pravidlem pravé ruky. Vně solenoidu jsou indukční čáry rozptýleny daleko od sebe. Magnetické pole je tedy mnohem slabší.

Pro ideální solenoid platí, že uvnitř je pole homogenní a vně nulové. Toto pro reálný solenoid platí tím přesněji, čím je jeho délka vůči průměru větší.

Velikost magnetické indukce se určí pomocí Ampérova zákona. Uzavřenou křivkou je zde obdélník abcd. [10]



Obrázek 3.4: Ampérová křivka [10]

Křivkový integrál  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  lze rozdělit na součet integrálů pro každý úsek křivky

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s}. \quad (3.6)$$

První integrál je roven  $Bh$ , kde  $h$  je délka křivky od  $a$  do  $b$ . Druhý, třetí a čtvrtý integrál jsou rovny nule.

Celkový proud  $I_c$  je dán součinem proudu  $I$ , který prochází cívkou, počtem závitů na jednotu délky  $n$  a délkou křivky  $h$

$$I_c = Inh. \quad (3.7)$$

Z dosazení do Ampérova zákona a vykrácení plyne

$$B = \mu_0 In. \quad (3.8)$$

[10]

### 3.1.4 Magnetický indukční tok

Velikost magnetického pole procházejícího smyčkou se nazývá magnetický tok. Jednotkou je Weber (Wb). Pro orientovanou smyčku ohraničující plochu  $\vartheta$  vloženou do magnetického pole  $\vec{B}$  platí

$$\Phi_B = \int_{\vartheta} \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (3.9)$$

V případě, kdy orientovaná smyčka leží v rovině kolmé k homogennímu magnetickému poli a směřuje-li  $d\vec{S}$  souhlasně s  $\vec{B}$ , je skalární součin roven  $BdS \cos 0^\circ = BdS$ . Integrál  $\int dS$  udává obsah  $S$  rovinné plochy. Potom se rovnice redukuje na tvar

$$\Phi_B = BS. \quad (3.10)$$

Za použití magnetického toku lze vyjádřit Faradayův zákon:

*Změnou magnetického pole v okolí cívky se v cívice indukuje el. napětí a v uzavřeném obvodu prochází indukovaný proud. Směr proudu je závislý na směru změny magnetického pole a na orientaci pólů magnetu vůči cívice. [10]*

Matematický zápis Faradayova zákona je

$$\varepsilon = -\frac{N\Phi_B}{dt}, \quad (3.11)$$

kde  $\varepsilon$  je elektromotorické napětí a  $N$  počet závitů.

Směr toku indukovaného proudu ve smyčce určuje Lenzův zákon:

*Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou. [10]*

### 3.1.5 Indukčnost solenoidu

Indukčnost je schopnost cívky vytvářet ve svém okolí magnetické pole. Magnetické tok  $\Phi_B$  uvnitř cívky je přímo úměrný procházejícímu proudu  $I$ . Celkový magnetický tok je dán superpozicí magnetických toků všech závitů  $N$ . Konstanta úměrnosti  $L$  se nazývá vlastní indukčnost cívky, její jednotkou je Henry (H) a platí

$$L = \frac{N\Phi_B}{I}. \quad (3.12)$$

Pro výpočet indukčnosti solenoidu se provede dosazení z rovnic (3.8) a (3.10). Za počet závitů na jednotku délky  $n$ , se dosadí podíl počtu závitů  $N$  a délky solenoidu  $l$ .

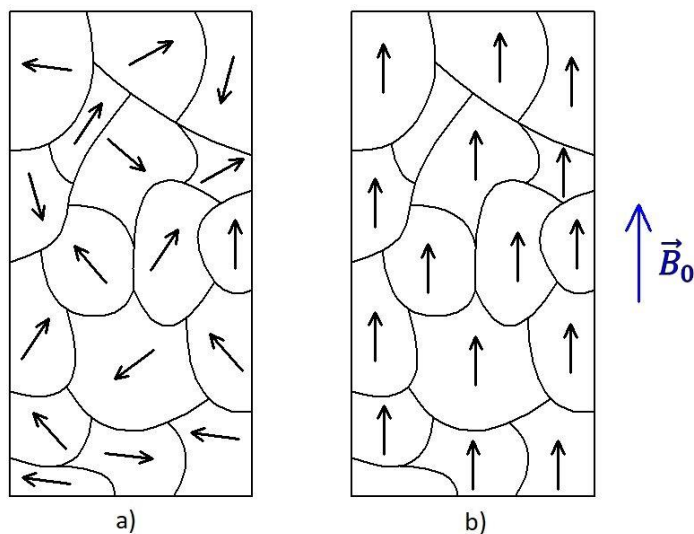
$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{NBS}{I} = \frac{NS\mu_0 I n}{I} = \frac{N^2 S \mu_0 l}{l} \quad (3.13)$$

Po upravení vyjde

$$L = \mu_0 N^2 \frac{S}{l}, \quad (3.14)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua a  $S$  plocha závitů solenoidu. Rovnice platí pro ideální solenoid, bez uvažování rozptylu magnetického pole na koncích solenoidu.

Magnetické vlastnosti solenoidu se dají ovlivnit vložením jádra z vhodného materiálu. Tyto materiály se nazývají feromagnetické a patří mezi ně železo, nikl a kobalt. Díky kvantově-mechanickému jevu zvanému výměnná interakce mají některé elektrony shodně seřazené dipólové momenty. Vznikají tak oblasti s výraznými magnetickými dipólovými momenty zvané domény. Tyto domény jsou orientovány náhodně ve všech směrech. Celková indukce materiálu je tedy nulová. Vnější magnetické pole však může tyto domény uspořádat, posílit domény, směřující stejným směrem a oslabit domény směřující opačně. Vytvoří se tak velký výsledný magnetický dipólový moment ve směru vnějšího pole. Po vyjmutí jádra z vnějšího magnetického pole zůstávají některé domény natočeny stejným směrem. Materiál je zmagnetizovaný. Pro jeho demagnetizaci je nutné vyvinout práci. Vznikají tak ztráty energie, které se nazývají hysterezní.



Obrázek 3.5: a) náhodně uspořádané domény,  
b) domény uspořádané ve směru vnějšího magnetického pole

Magnetická indukce cívky s jádrem je obvykle mnohonásobně větší než indukce samotné cívky. Velikost výsledné indukce  $B$  lze zapsat jako součet

$$B = B_0 + B_M, \quad (3.15)$$

kde  $B_0$  je indukce cívky a  $B_M$  indukce jádra.



Vliv materiálu na magnetické pole určuje permeabilita. Podíl permeability materiálu a permeability vakua se nazývá relativní permeabilita. V tabulce 3.1 jsou uvedeny relativní permeability některých materiálů.

Tabulka 3.1: Relativní permeability některých materiálů [11]

materiál	$\mu_r$
permalloy	100 000
ferit	20 000
železo	5 000
kobalt	80 - 200
kalená ocel	40

Velikost elektromagnetické indukce se určí dle vzorce (3.8) vynásobeném relativní permeabilitou

$$B = \mu_0 \mu_r I n . \quad (3.16)$$

To se promítne i do vzorce (3.14) pro výpočet indukčnosti solenoidu

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{S}{l} . \quad (3.17)$$

[10]

### 3.1.6 Vlastní indukce

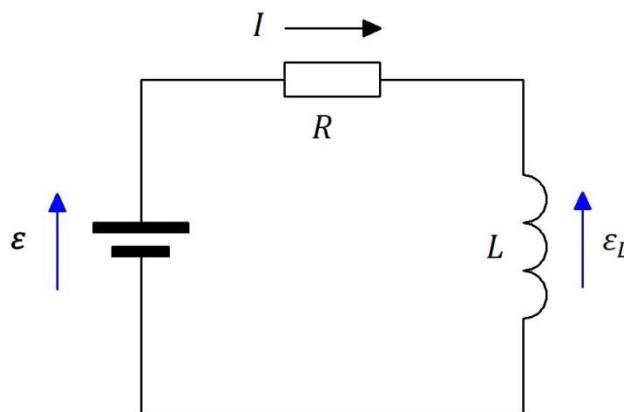
V každé cívce, v níž se mění velikost elektrického proudu v závislosti na čase, dochází k indukování elektromotorického napětí  $\varepsilon$ . Tento jev se nazývá vlastní indukce. Pomocí rovnic (3.11) a (3.14) se dá odvodit vztah pro výpočet indukovaného  $\varepsilon_L$  v cívce

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} . \quad (3.18)$$

Podle Lenzova zákona značí znaménko mínus, že indukované  $\varepsilon_L$  brání změně proudu, která jej vyvolala. [10]

### 3.1.7 Cívka v elektrickém obvodu

Vodič, ze kterého ji cívka vinuta, má nenulový odpor. V obvodu se to projeví jako sériové zapojení ideální cívky indukující  $\varepsilon_L$  a rezistoru, který reprezentuje odpor vinutí. Vznikne tak RL obvod.



Obrázek 3.6: RL obvod

Podle 2. Kirchhoffova zákona jsou napětí v obvodu rozložena takto

$$+\varepsilon - IR - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (3.19)$$

a platí

$$IR + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon . \quad (3.20)$$

Proud procházející cívkou je závislý na čase. Dochází tak k přechodovým dějům, které lze popsat rovnicemi pro růst proudu

$$I = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}) \quad (3.21)$$

a pro jeho pokles

$$I = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{\tau_L}} , \quad (3.22)$$

kde  $\tau_L$  je časová konstanta, daná podílem indukčnosti  $L$  a odporem  $R$

$$\tau_L = \frac{L}{R} . \quad (3.23)$$

[10]

### 3.1.8 Energie magnetického pole

Podobným způsobem jako se hromadí energie v elektrickém poli, dochází k jejímu hromadění i v magnetickém poli. Tuto energii je možné kdykoli získat zpět. Pro její výpočet se vynásobí rovnice (3.20) proudem  $I$ . To umožní pracovat s energií a výkonem.

$$\varepsilon I = I^2 R + LI \frac{dI}{dt} \quad (3.24)$$

Uvedená rovnice představuje zákon zachování energie a její rozložení v obvodu. Levá strana rovnice představuje výkon zdroje, s jakým dodává energii do obvodu. První člen na pravé straně reprezentuje tepelný výkon rezistoru, tedy disipaci energie do okolí. Druhý člen na pravé straně představuje rychlost hromadění energie v magnetickém poli  $dE_{mg}/dt$  a platí

$$\frac{dE_{mg}}{dt} = LI \frac{dI}{dt}. \quad (3.25)$$

Rovnice se zjednoduší na tvar

$$dE_{mg} = LI dI \quad (3.26)$$

a integruje

$$\int_0^{E_{mg}} dE_{mg}' = \int_0^I LI' dI'. \quad (3.27)$$

Výsledný vztah představuje energii magnetického pole vytvořeného cívkou protékanou proudem  $I$ .

$$E_{mg} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (3.28)$$

[10]

### 3.1.9 Síla solenoidu

Energie magnetického pole cívky dle rovnice (3.28) závisí na její indukčnosti a proudu, který jí protéká. Pokud se bude jádro cívky (projektil) pohybovat v její ose o jednotku délky  $dx$ , bude vykonána práce o velikosti  $dW = F_x dx$ . Vykonaná práce se projeví změnou energie magnetického pole. Síla působící na jádro se tedy určí derivací energie magnetického pole cívky podle změny polohy jádra.

$$F_{mg} = \frac{dE_{mg}}{dx} \quad (3.29)$$

Indukčnost se mění v závislosti na poloze projektilu v cívce. Velikost indukčnosti tedy bude závislá na dráze  $dx$ . Velikost procházejícího proudu se bude v čase také měnit. Po dosazení do vztahu (3.29) vyjde

$$F_{mg} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} \frac{dI^2}{dt} \quad (3.30)$$

Cívky, které slouží k vystřelování projektilů, mají obvykle malou indukčnost a tím také časovou konstantu  $\tau_L$ . Procházející proud se rychle ustálí. Je tedy možné přechodové děje s určitou chybou zanedbat a počítat s proudem  $I$  jako s konstantou. Vztah (3.30) se zjednoduší na tvar

$$F_{mg} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} I^2 \quad (3.31)$$

[10]

## 3.2 Energetické ztráty

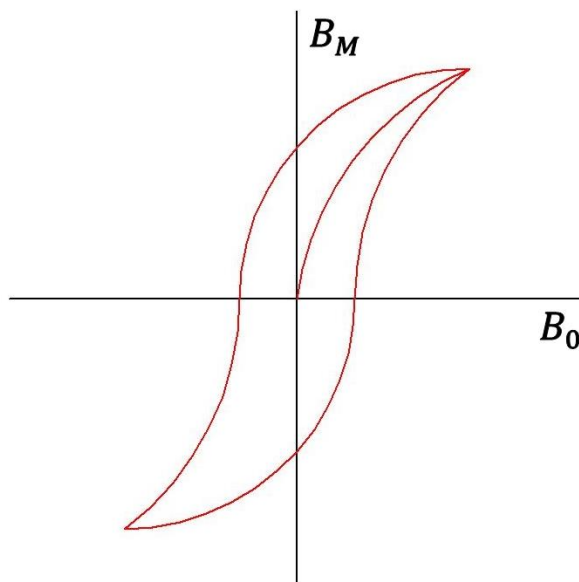
Při výstřelu i během letu dochází k řadě procesů, při nichž se energie ztrácí. Nejčastěji při těchto procesech dochází k přeměně elektrické či mechanické energie na tepelnou a její disipaci do okolí. Volbou vhodných opatření je možné tyto ztráty zmenšit a zvýšit tak účinnost zbraně až o několik procent.

### 3.2.1 Ztráty vířivými proudy

Během pohybu vodivého projektilu v magnetickém poli se uvnitř indukují proudy. Tyto proudy se nazývají vířivé a způsobují zahřívání projektilu a tím disipaci energie do okolí. Tyto ztráty lze zmírnit volbou vhodného materiálu projektilu. Ten musí mít vysokou relativní permeabilitu a zároveň nízkou konduktivitu (vodivost). Tím se sníží velikost indukovaných vířivých proudů. [12]

### 3.2.2 Hysterezní ztráty

Tyto ztráty souvisejí s již zmíněným kvantově-mechanickým jevem výměnné interakce. V materiálu projektilu se vyskytují domény se shodným magnetickým dipólovým momentem. K jejich natočení, posílení nebo oslabení je třeba vykonat práci. Chování materiálu při magnetizaci popisuje hysterezní křivka. Je to závislost magnetické indukce jádra  $B_M$  na vnější indukci cívky  $B_0$ .



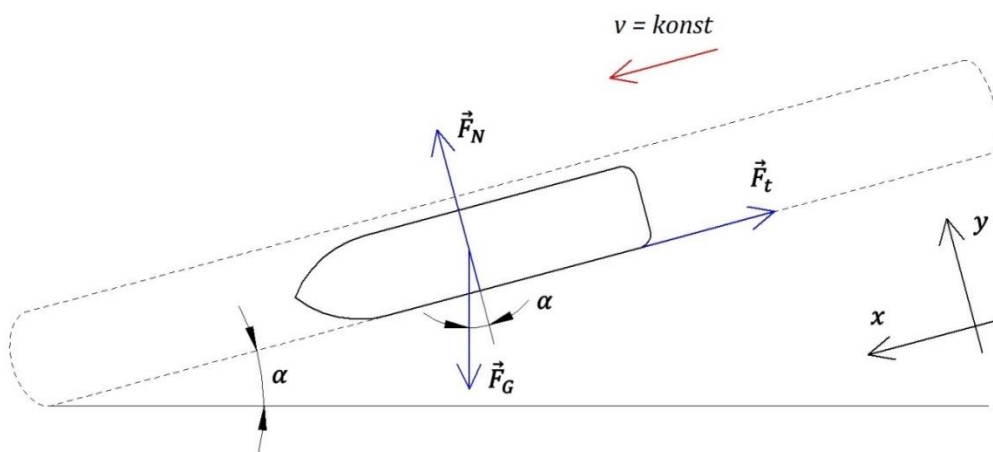
Obrázek 3.7: Hysterezní křivka [10]

Materiál se nejprve pohybuje po křivce prvotní magnetizace. Z nezmagnetizovaného stavu se při zvyšování vnější indukce  $B_0$  dostává do zmagnetizovaného stavu. Po snížení vnější indukce  $B_0$  na nulu, zůstává jádro částečně zmagnetizováno. Pro obrácení směru magnetické indukce jádra  $B_M$  a natočení domén opačným směrem je třeba vykonat práci. Tato práce je úměrná obsahu plochy křivky.

Velikost vnější indukce  $B_0$  se dle rovnice (3.8) mění s velikostí procházejícího proudu. Při určité hodnotě  $B_0$  jsou již všechny domény natočeny shodným směrem a magnetická indukce jádra  $B_M$  se nadále nezvyšuje. Tento stav se nazývá nasycení a po jeho dosažení již nedochází k výrazným nárůstům indukce, nehledě na velikost procházejícího proudu. [10]

### 3.2.3 Ztráty třením

Při pohybu projektilu hlavní dochází k jejich vzájemnému tření. Pro určení třecí síly, působící proti pohybu, je třeba znát koeficient tření  $f$ . Za předpokladu, že se projektil může v hlavní volně pohybovat, lze určit koeficient tření experimentálně. Projektil se vloží do hlavní. Ta se bude otáčet směrem dolů. Při určitém úhlu natočení  $\alpha$  se dá projektil samovolně do pohybu.



Obrázek 3.8: Určení třecího koeficientu náboje v hlavní

Po sestavení pohybových rovnic a vyjádření koeficientu tření  $f$  vyjde

$$f = \tan \alpha \quad (3.32)$$

a pro velikost třecí síly platí

$$F_t = fmg \cos \alpha, \quad (3.33)$$

kde  $m$  je hmotnost střely a  $g$  tíhové zrychlení.

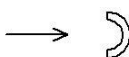
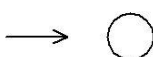




### 3.2.4 Ztráty vyvolané odporem prostředí

Při pohybu projektilu na něj působí odporové síly vyvolané třením o vzduch. Velikost odporové síly lze určit pomocí Newtonova zákona odporu

$$F_d = \frac{1}{2} C_x \rho S v^2, \quad (3.34)$$

kde  $C$  je činitel odporu,  $\rho$  je hustota prostředí,  $S$  průřez projektilu a  $v$  jeho rychlost. Činitel odporu  $C$  je určen experimentálně a závisí na tvaru tělesa a jeho povrchu. [13]

Tabulka 3.2: Činitele odporu pro některé tvary těles [13] [14]

tvar tělesa	C
	1,4
	0,45
	0,05
	0,15
	0,5
	0,25

## 4 Dynamika projektilu a simulace

V předchozí kapitole 3 bylo popsáno, jakým způsobem dochází k přeměně energie magnetického pole cívky na kinetickou energii střely a kde během procesu výstřelu dochází k energetickým ztrátám. V této kapitole budou odvozené vztahy dosazeny do pohybových rovnic a vloženy do simulace programu Matlab Simulink.

### 4.1 Pohyb projektilu v hlavni

Pro určení zrychlení projektilu, úst'ové rychlosti a dostřelu se využije Newtonova druhého pohybového zákona

$$F = ma . \quad (4.1)$$

Síla  $F$  se určí z rozdílu síly magnetického pole solenoidu  $F_{mg}$  a sumy všech odporových sil  $F_z$

$$F = F_{mg} - \sum F_z . \quad (4.2)$$

Vztah pro určení zrychlení  $a$  bude ve tvaru

$$a = \frac{x''}{d^2t} = \frac{1}{m} (F_{mg} - \sum F_z) . \quad (4.3)$$

K určení okamžité rychlosti  $v$  se provede integrace vztahu (4.3) dle času, přičemž úst'ová rychlost bude rovna maximální rychlosti projektilu po průletu poslední cívku

$$v = \frac{x'}{dt} = \frac{1}{m} (F_{mg} - \sum F_z) t + v_0 , \quad (4.4)$$

kde  $v_0$  je počáteční rychlost projektilu, která může být daná například rychlostí podávacího mechanismu. K určení polohy střely  $x$  v hlavni se použije druhá časová integrace vztahu (4.3)

$$x = \frac{1}{2m} (F_{mg} - \sum F_z) t^2 + v_0 t + x_0 . \quad (4.5)$$

[10]

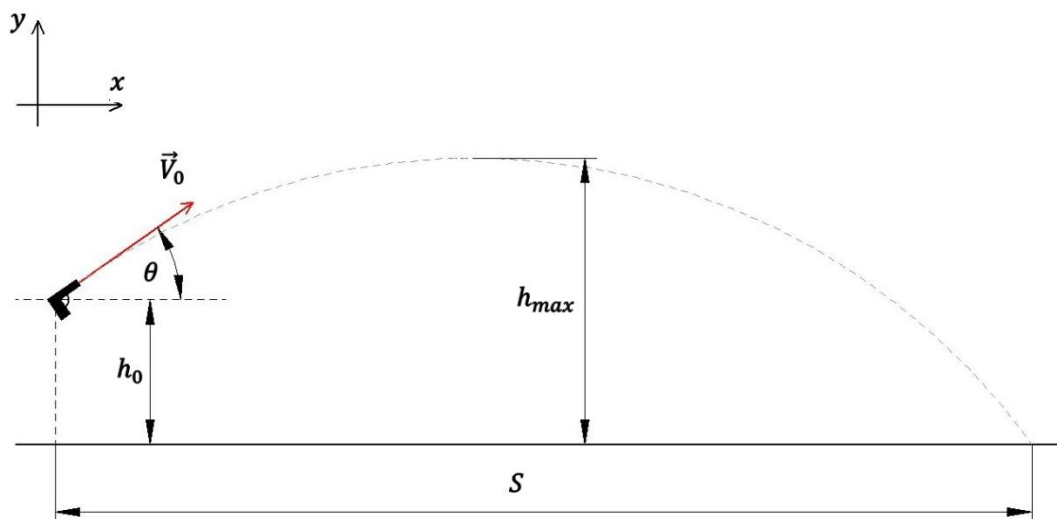


## 4.2 Pohyb projektilu v prostředí

Hlavní ztrátová síla, působící proti pohybu střely, je vyvolána odporem prostředí. Podle druhého Newtonova zákona (4.1) lze tuto sílu převést na zrychlení působící proti pohybu střely. Za odporovou sílu  $F_d$  se dosadí vztah (3.34).

$$a_d = \frac{F_d}{m} \quad (4.6)$$

K určení dostřelu zbraně je nutné znát počáteční rychlost střely (úst'ovou rychlost), elevační úhel a relativní výšku mezi zbraní a cílem. Řešení lze provést rozložením pohybu na vertikální ( $y$ ) a horizontální ( $x$ ) složku. Na vertikální složku pohybu bude působit tíhové zrychlení a lze z ní zjistit maximální výšku letu. Z horizontální složky pohybu lze zjistit dostřel. Na obě složky působí odporová síla prostředí.



Obrázek 4.1: Trajektorie střely

Pohybové rovnice

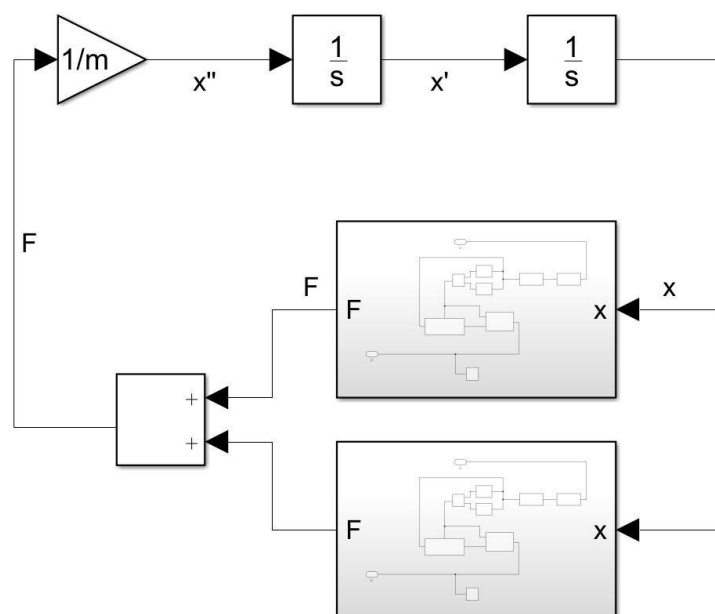
$$X: S = -\frac{1}{2}a_{dx}t^2 + v_0 \cos \theta t \quad (4.7)$$

$$Y: h = -\frac{1}{2}(g + a_{dy})t^2 + v_0 \sin \theta t + h_0 \quad (4.8)$$

### 4.3 Simulace pohybu projektilu v hlavni

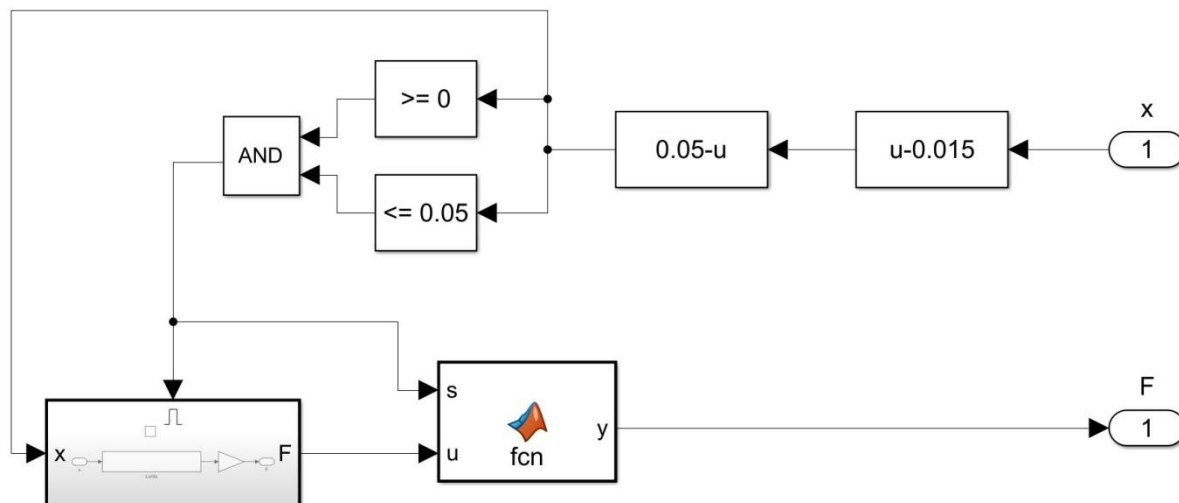
Pro simulaci modelu je třeba zadat konfiguraci zbraně (tj. počet cívek, rozměry cívek a jejich umístění). Také je třeba zadat závislost  $dL/dx$ . Ta se dá zjistit změřením závislosti indukčnosti na poloze jádra a poté derivací podle polohy, nebo podílem síly, kterou působí solenoid na jádro a druhé mocnině proudu procházejícího solenoidem. Rovněž je třeba zadat velikost proudu. Ten je možné určit podle Ohmova zákona, tedy podílem napětí zdroje odporem obvodu.

Model může tvořit jedna nebo více cívek. Každou z cívek reprezentuje jeden subsystém. Síly od cívek se postupně sčítají a přepočítávají na zrychlení. To se dále integruje na rychlost a polohu.



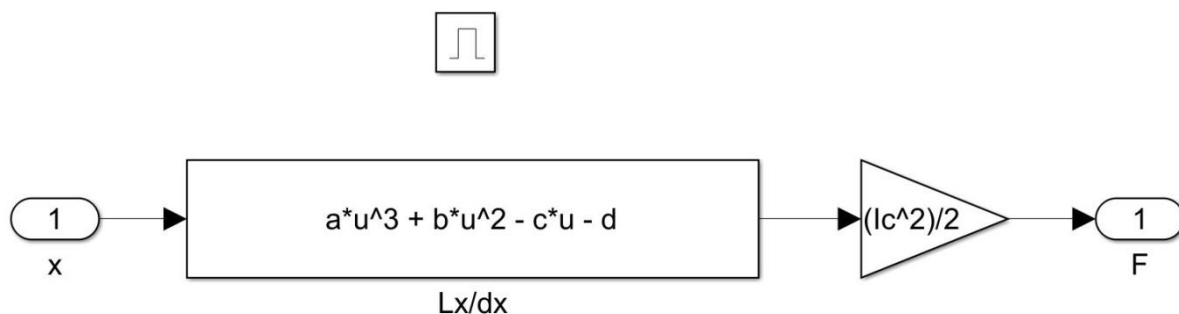
Obrázek 4.2: Schéma programu pro dvě cívky

Pořadí, ve kterém se cívky spustí, je dáno jejich vzdáleností od počátku hlavně. V každém subsystému se odečítá poloha cívky  $k$  od aktuální polohy projektilu  $x$ . Pokud má cívka délku  $l$  a výsledná poloha je právě v rozmezí 0 až  $l$ , znamená to, že se projektil právě nachází v příslušné cívce a dojde k jejímu spuštění.



Obrázek 4.3: Subsystém

Z obrázku 4.3 vyplývá, že se cívka nachází ve vzdálenosti  $k = 15\text{mm}$  od počátku hlavně. Poté v subsystému dochází k odečtu aktuální polohy projektilu  $x$  od délky cívky ( $l = 50\text{mm}$ ), aby platilo, že se střela při vstupu do cívky nachází 50mm od úplného zasunutí, tedy na jejím okraji. Dále následuje podmínka, že pokud se projektil nachází ve vzdálenosti větší než 0mm a menší než 50mm od cívky, dochází k přepočtu polohy na sílu prostřednictvím subsystému obsahujícího rovnici (3.31). Blok Matlab function zajistí, že na výstupu bude při nečinnosti 0.

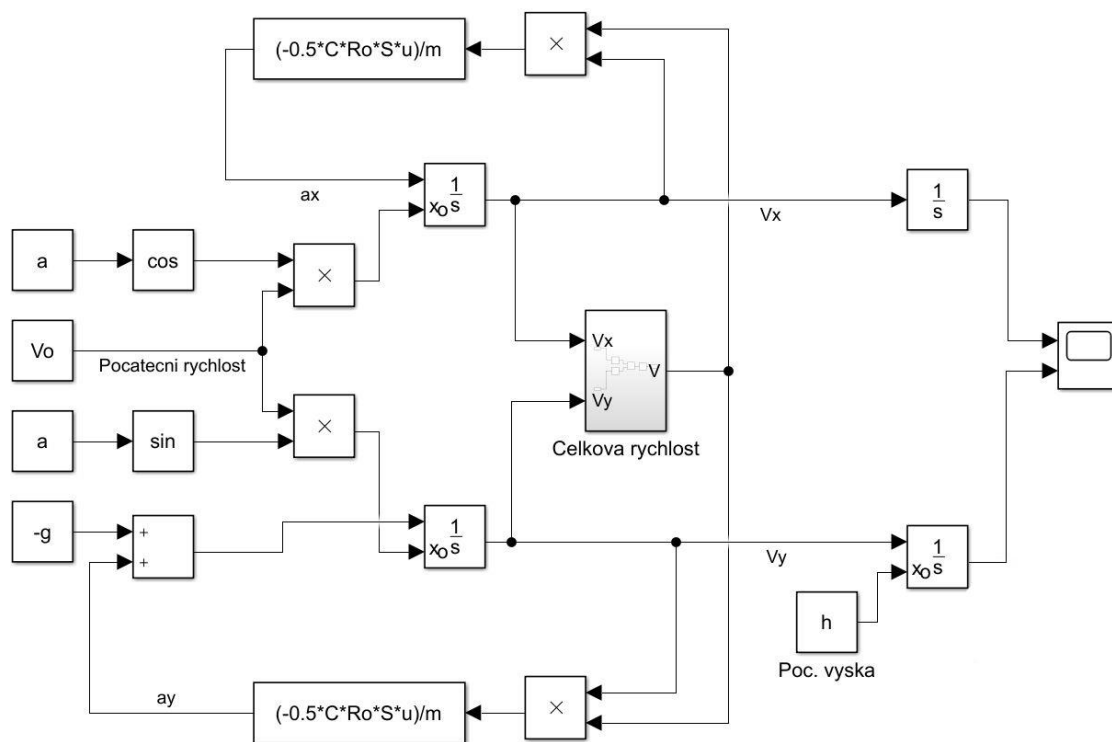


Obrázek 4.4: Enabled subsystem obsahující rovnici 3.31

V subsystému obsahujícím rovnici (Obrázek 4.4) se prostřednictvím polynomu přepočte poloha na změnu indukčnosti v závislosti na poloze. Následně se vynásobí  $\frac{1}{2}$  a druhou mocninou proudu. Výstupem je síla magnetického pole solenoidu.

## 4.4 Simulace trajektorie

Pro výpočet trajektorie letu střely jsou využity pohybové rovnice (4.7) a (4.8). Horizontální a vertikální složky pohybu jsou počítány zvlášť. Vstupními hodnotami jsou relativní výška zbraně vůči cíli, úst'ová rychlost střely a úhel náměru. Je také třeba zadat hodnoty tíhového zrychlení a konstant, potřebných pro výpočet odporové síly prostředí.



Obrázek 4.5: Schéma modelu pro výpočet trajektorie

## 5 Návrh a výroba prototypu

Zbraň je navržena tak, aby se maximální proud v cívkách pohyboval kolem 50A. Jako zdroj energie slouží Lithium-polymerový akumulátor, který je schopen poskytnout proud 200A i více. Běžně se u takových zbraní používají kondenzátory, které jsou schopny pulzně poskytnout velké hodnoty proudu. Nabíjení kondenzátorů však vyžaduje delší dobu a tvorbu dodatečných obvodů pro jejich dobíjení. Vynecháním kondenzátorů zmizí i prodleva, potřebná k dobíjení a ihned může dojít k dalšímu výstřelu. To tedy umožňuje, že je zbraň schopna střílet automaticky.

### 5.1 Projektil

Projektil bude při průletu cívkou tvořit její jádro, proto musí mít podobné vlastnosti, jako mají jádra cívek. Měl by být tvořen materiálem s vysokou permeabilitou, kvůli zvýšení indukčnosti cívky a tím i síly, která na něj působí. Dále to musí být materiál s nízkou konduktivitou, kvůli zamezení indukování vířivých proudů a vzniku sil, působících proti pohybu střely. Materiál by měl také disponovat úzkou hysterezní smyčkou, aby bylo zamezeno ztrátám vzniklým při magnetizaci a demagnetizaci projektilu.

Ferity nejsou vhodné pro jejich křehkost a obtížné opracování. Magneticky měkké oceli jsou vhodnější. Mají úzkou hysterezní smyčku, vysokou permeabilitu a snadno se opracovávají. Nevýhodou je jejich snadná deformace při nárazu a problematická opětovná použitelnost. Také mají vyšší konduktivitu. Bude tedy docházet k vytváření vířivých proudů.

Vhodné by mohly být i některé slitiny železa, niklu a kobaltu, jako je například Permalloy. Tyto slitiny mají vysokou permeabilitu a nejčastěji se využívají k odstínění nízkofrekvenčních magnetických polí. Při použití těchto materiálů dojde ke značnému navýšení indukčnosti cívky. Při zvýšení indukčnosti však dojde i ke zvýraznění přechodových jevů, které by už nebylo možné zanedbat. Nevýhodou je také jejich obtížná dostupnost.

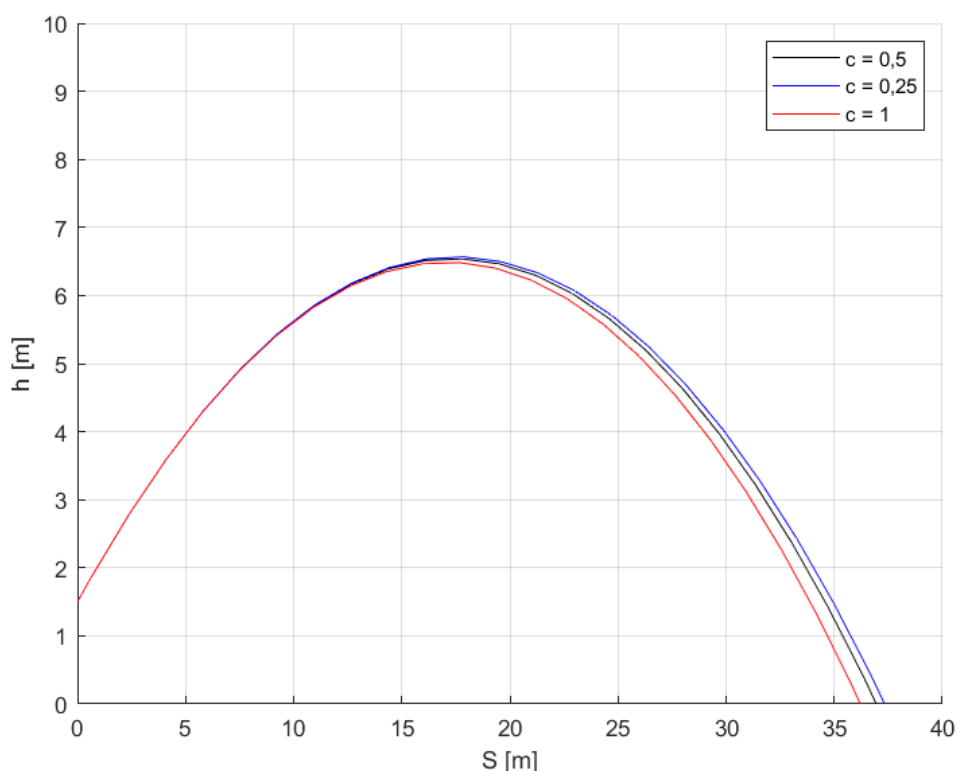
Na výrobu zkušebních projektilů byla využita povrchově kalená ocel používaná v lineárních posuvech. Hlavními výhodami této oceli je snadná dostupnost, obrobitelnost a odolnost vůči povrchovým deformacím. Nevýhodou je vcelku nízká relativní permeabilita kalené oceli. Pohybuje se v rozmezí 10 až 40. V projektilu bude také docházet k indukování vířivých proudů.

Průměr projektilu je dán průměrem ocelového prutu, tedy 6mm. Jeho délka je 50mm. Tvar projektilu je důležitý pro snížení činitele odporu a zajištění přímého letu. Pro účely testování bylo vyrobeno několik různých typů. Kvůli umístění nábojů v zásobníku, kde se náboje po sobě posouvají a potřebě jejich většího počtu, byl zvolen nejjednodušší tvar se špičkou.



Obrázek 5.1: Zkušební projektily

Pomocí modelu pro výpočet trajektorie lze znázornit, jaký vliv mají různé činitele odporu na trajektorii střely. Pro simulaci byla použita rychlost 20m/s, úhel náměru  $10^\circ$  a výška zbraně 1,5m. Koeficient  $C = 1$  náleží projektilu bez špičky,  $C = 0,5$  používaným projektilům a  $C = 0,25$  nejaerodynamičtějším projektilům, které lze teoreticky použít.



Obrázek 5.2: Trajektorie pro vybrané činitele odporu

Z výsledků znázorněných na obrázku 5.2 plyne, že rozdíl v dostřelu může činit až několik desítek centimetrů. U projektilu bez špičky také dojde ke snížení průraznosti.

## 5.2 Cívka

Délka cívky je dána délkou projektilu, aby bylo možné přesně řídit její spuštění a vypnutí. Před cívkou se nachází IR brána. Pokud brána zaznamená projektil, spustí cívku. Když projektil bránu opustí, nachází se ve středu cívky a dojde k jejímu vypnutí.

Vnitřní průměr cívky se řídí vnějším průměrem hlavně. Vnější průměr je dán počtem vrstev vinutí. K výrobě bude použit drát o průměru 1mm. Počet vrstev je lichý, díky čemuž bude na každé straně cívky jedna vstupní svorka. To zajistí snazší identifikaci vstupního a výstupního vodiče. Vhodné je navinout 3, 5 nebo 7 vrstev vinutí. Pomocí vztahu (3.14) lze spočítat jejich přibližnou indukčnost bez jádra.

$$L_3 = 40\mu H$$

$$L_5 = 265\mu H$$

$$L_7 = 890\mu H$$

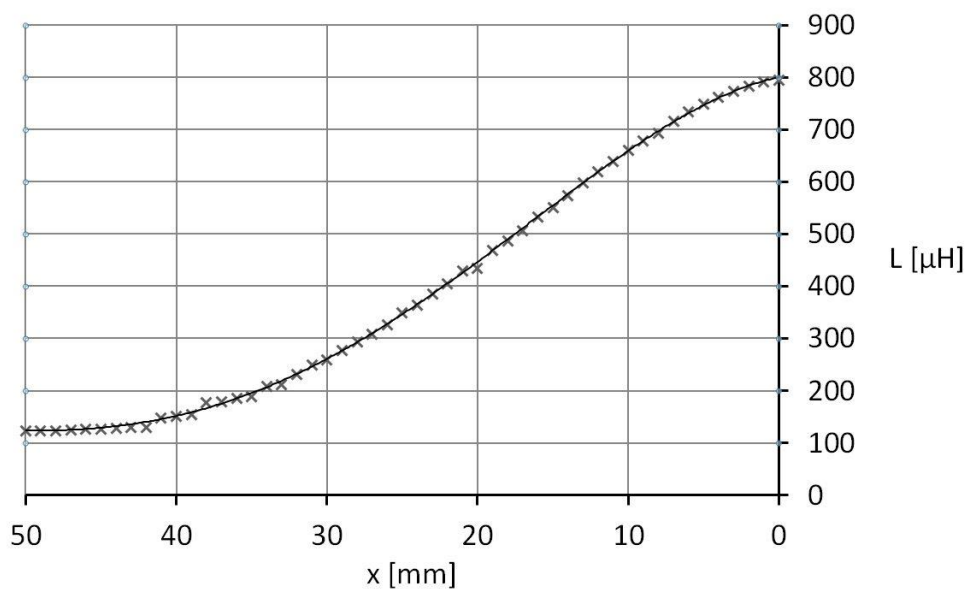
Indukčnost cívky se třemi vrstvami vinutí je příliš nízká a kvůli nízkému počtu závitů má cívka malý odpor, což by vedlo k příliš vysokým hodnotám proudu. Cívka se sedmi vrstvami vinutí má největší indukčnost, je však příliš těžká a rozměrná. Nejvhodnější je použití pětivrstvé cívky, která kombinuje dobrou indukčnost, nízký odpor a malou hmotnost. Indukčnost reálné cívky se však může lišit, protože se nepodaří navinout přesný počet závitů. Také geometrie může být odlišná.

### 5.2.1 Závislost $dL/dx$

Tato závislost je nutná pro možnost simulovat chování zbraně ve výpočtovém modelu. Pro její získání byl vytvořen prototyp odpalovací cívky. K určení závislosti lze použít dvou metod. První spočívá ve změření indukčnosti cívky v závislosti na poloze jejího jádra. Druhá metoda využívá měření síly a proudu v závislosti na poloze jádra.

### 5.2.2 Závislost indukčnosti na poloze jádra

K měření indukčnosti byl použit multimetr. Jádro bylo vsouváno do cívky po milimetrových krocích. Hodnoty byly poté vloženy do grafu a proloženy polynomicou spojnicí trendu 4. stupně. Tento polynom byl následně derivován podle polohy  $x$ .



Obrázek 5.3: Závislost indukčnosti na poloze jádra

Rovnice popisující závislost  $L$  na  $x$  je ve tvaru

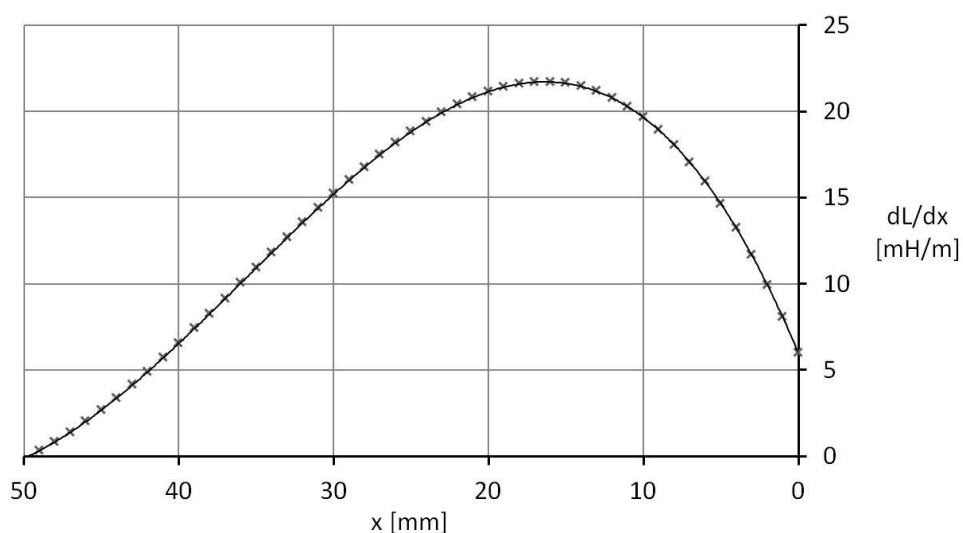
$$L = -196,5532x^4 + 28,13x^3 - 1,0654x^2 - 0,006x + 0,0008. \quad (5.1)$$



Derivace této funkce dle  $x$  má tvar

$$\frac{dL}{dx} = -786,5532x^3 + 84,39x^2 - 2,1308x - 0,006 \quad (5.2)$$

a podoba této křivky je znázorněna na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4: Závislost derivace indukčnosti na poloze jádra

Při měření mohlo dojít k zanesení chyb vlivem nepřesně nastavené polohy jádra, odečítání hodnot z multimetru a zaokrouhlováním členů polynomu.

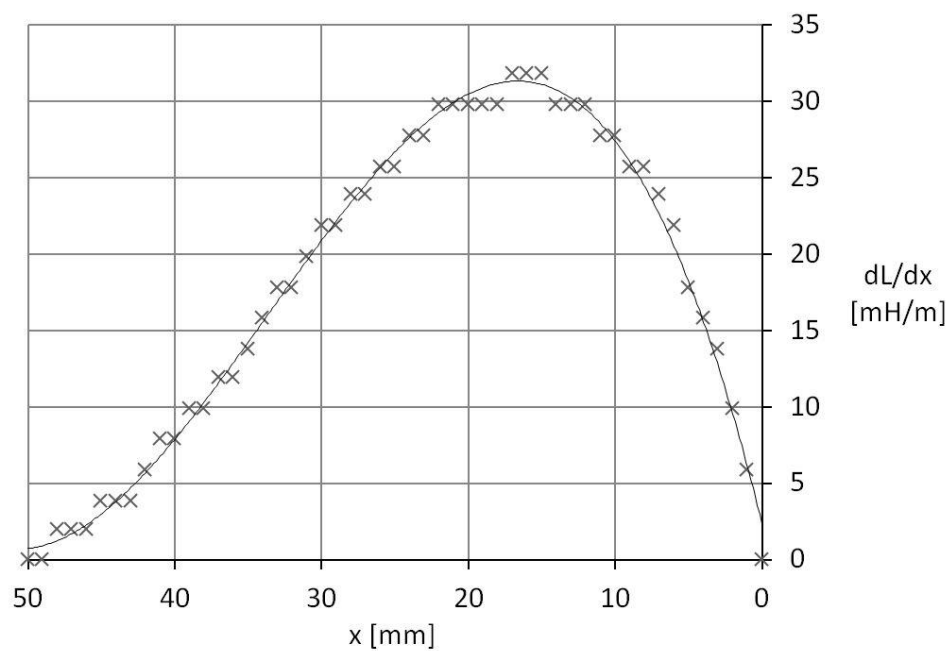
### 5.2.3 Závislost síly na poloze jádra

Ze vztahu (3.31) vyplývá, že lze potřebnou závislost  $dL/dx$  získat podílem síly solenoidu a druhé mocniny proudu. Pro měření síly byl použit hmotnostní senzor 0 – 100g a AD převodník s čipem HX711. Cívka s jádrem byla orientována svisle, aby nedocházelo k ovlivnění měření třecí silou, která vzniká mezi cívkou a jádrem. Na jádro tak působí pouze tíhová síla, kterou je možné od výsledků snadno odečíst. Cívka byla umístěna na závitové tyči s roztečí 1mm. Při otočení o jednu otáčku se tedy cívka posunula o 1mm. Proud procházející cívkou byl konstantní.



Obrázek 5.5: Měření síly solenoidu

Výsledky byly pomocí vztahu (3.31) přepočítány na derivaci indukčnosti dle polohy a vyneseny do grafu v závislosti na poloze. Body byly proloženy polynomicou spojnicí trendu 3. stupně.



Obrázek 5.6: Závislost derivace indukčnosti na poloze jádra

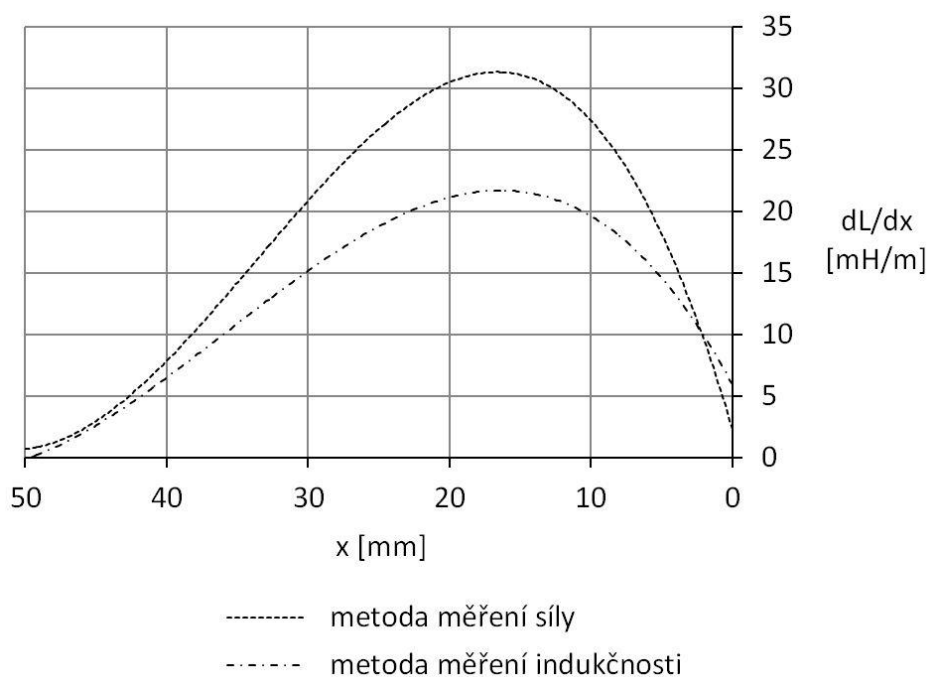
Polynomická funkce je tvaru

$$\frac{dL}{dx} = 1705,4x^3 - 170,01x^2 + 4,262x. \quad (5.3)$$

Také toto měření je zatíženo chybami, které spočívají především v nepřesně kalibrovaném senzoru a jeho rozlišení.

## 5.2.4 Porovnání obou metod

Výsledné závislosti obou metod byly vloženy do grafu (Obrázek 5.7) pro porovnání.



Obrázek 5.7: Porovnání obou metod

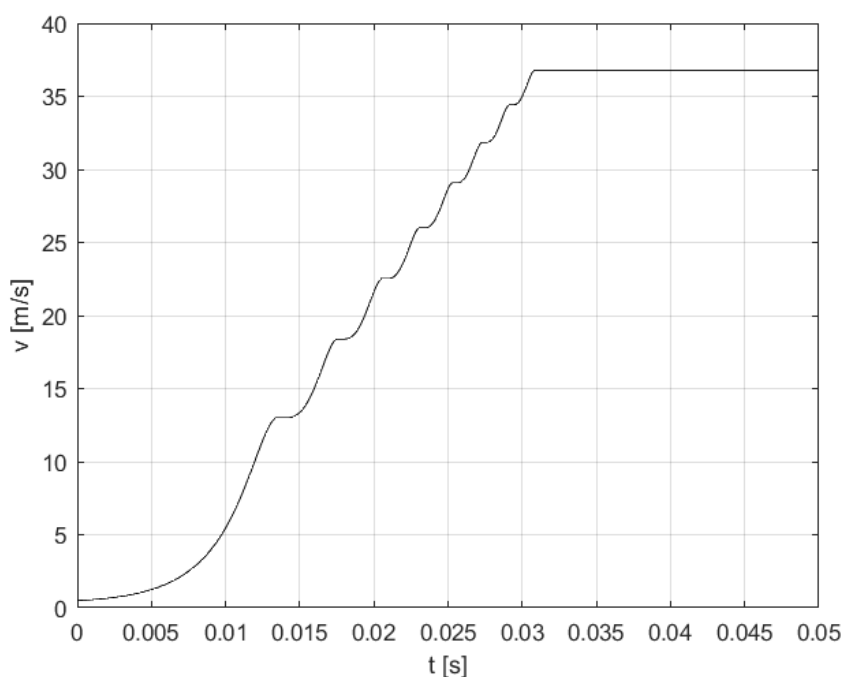
Zobrazené křivky udávají tvar, jaký bude mít průběh síly solenoidu v závislosti na poloze jádra. Po vynásobení  $\frac{1}{2} I^2$ , dle rovnice (3.31), bude možné zobrazit průběh skutečné síly v závislosti na poloze jádra.

Závislosti obou metod mají podobný průběh. Při použití jádra tvaru válce, by měly křivky svůj počátek i konec v nule a maximum zhruba při polovičním zasunutí do cívky. Protože má však jádro na jedné straně špičku, jsou křivky lehce posunuty vpravo.

Pro simulaci bude použita metoda měření indukčnosti, která je pravděpodobně zatížena menší chybou měření.

### 5.2.5 Stanovení počtu cívek

Pro stanovení ideálního počtu cívek bude použita simulace. Ta pomůže odhadnout, s jakým počtem cívek bude rychlost projektilu spolehlivě narůstat. Při použití příliš velkého počtu cívek nemusí už v posledních v řadě docházet k nárůstům rychlosti, protože je řídicí systém nebude stíhat zapínat a vypínat. S větším počtem cívek také dochází ke zvětšení rozměrů a především k citelnému nárůstu hmotnosti.



Obrázek 5.8: Simulovaný průběh rychlosti pro osm cívek

Model je simulován pro pušku s osmi cívkami. Každá cívka měří 50mm a jsou od sebe vzdáleny 10mm. Projektil má počáteční rychlost  $v_0 = 0,5\text{m/s}$ . Proud je nastaven na 50A. Ve výpočtu jsou zanedbány všechny odporové síly, reálný průběh rychlosti tak může být dosti odlišný. Z grafu se dá ovšem spolehlivě určit, že k nejvyššímu nárůstu rychlosti dojde v první cívce. Naopak k nejmenším nárůstům rychlosti dojde v posledních dvou cívkách. Z tohoto důvodu a z důvodů souvisejících s konstrukcí hlavně bude vyráběná zbraň obsahovat pouze šest cívek.

## 5.3 Hlaveň

Hlaveň zbraně slouží k vedení projektilu. Vzhledem k principu funkce Gaussovy pušky musí mít některé specifické vlastnosti. Hlaveň musí být vyrobena z materiálu s nízkou permeabilitou a konduktivitou, aby nedocházelo ke stínění magnetického pole a indukování vířivých proudů. Dále musí být pevná a otěruvzdorná.

### 5.3.1 Materiál

Z důvodů potřeby specifického vnitřního průměru bude hlaveň vytištěna na 3D tiskárně. Většina běžně prodávaných trubic má vnitřní průměr 6mm. Stejný průměr mají i projektily. Bylo by tedy nutné hlaveň nebo projektily dodatečně opracovat.

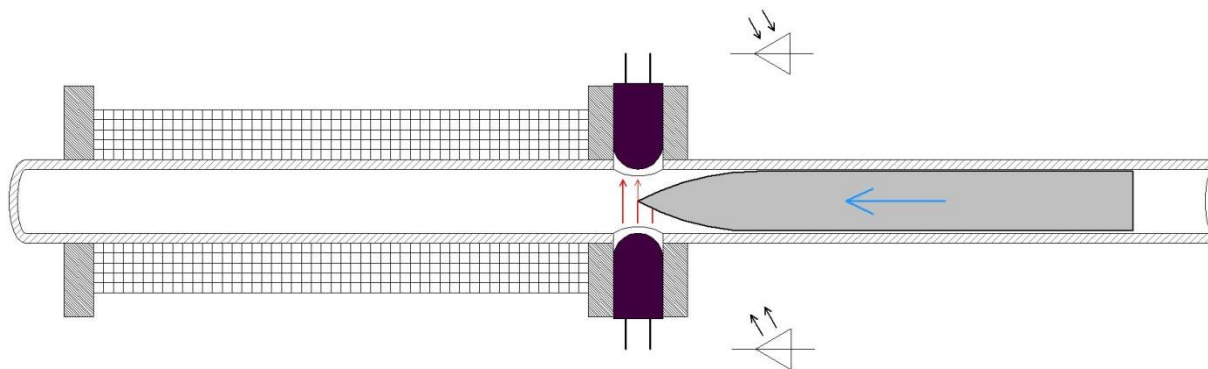
Potřebným vlastnostem nejlépe odpovídá materiál PLA, který je pevný, odolný a umožňuje dostatečně přesný tisk. Jeho hlavní nevýhodou je nízká teplotní odolnost. PLA ztrácí mechanické vlastnosti již při 60°C. Proto je důležité vyvarovat se přehřátí hlavně. Kvůli kruhovému průřezu bude muset být hlaveň tištěna vertikálně. Maximální výška objektů, které lze na dostupné tiskárně vytvořit je 200mm.

### 5.3.2 Rozměry

Vnitřní průměr hlavně bylo vzhledem k nepřesnostem v tisku nutné určit experimentálně. Nejmenší průměr, při kterém se může projektil volně pohybovat, je 6,4mm. Vnější průměr hlavně byl s ohledem na potřebu přiblížit vinutí co nejblíže projektilu stanoven na 8,4mm. Délka hlavně je dána počtem cívek. V případě šesti cívek byly vytištěny dvě dvoustmilimetrové hlavně, které se následně spojily.

## 5.4 Detekce projektilu

Pro zjištění přítomnosti projektilu je před každou cívkou umístěna IR brána. Pokud projektil zastíní fotodiodu, dojde k poklesu napětí, mikropočítač zaznamená pokles napětí a vyšle signál ke spuštění cívky. Když projektil opustí IR bránu, napětí na fotodiodě se opět navýší a mikropočítač přestane vysílat spouštěcí signál.



Obrázek 5.9: Projektil vstupující do IR brány

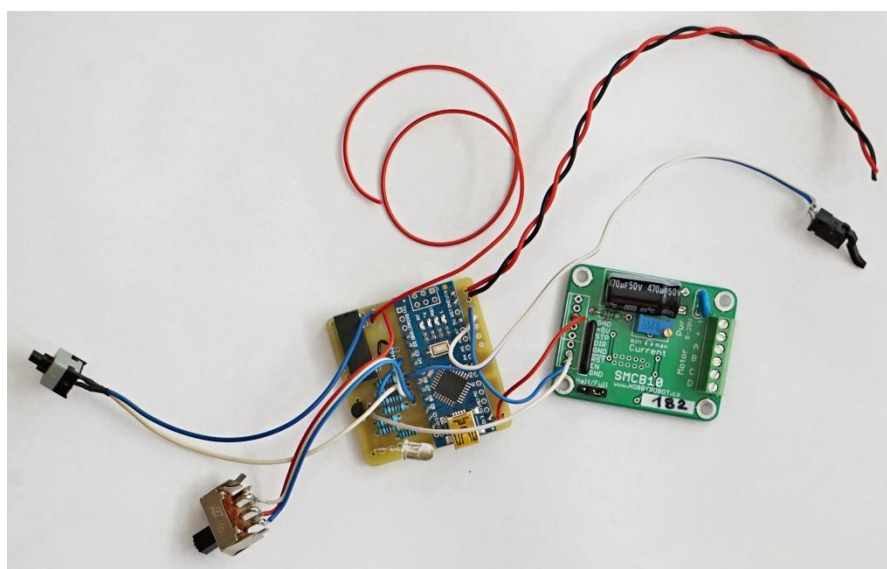
Z umístění IR brány vůči cívce vyplývá, že ke spuštění a vypnutí nedojde přesně ve chvíli, kdy je projektil na kraji cívky či v jejím středu. To může vést ke snížení účinnosti. Ze změřených závislostí  $dL/dx$  je ale zřejmé, že při vstupu do cívky a také při dosažení jejího středu působí na projektil nejmenší síla. Rovněž sepnutí a vypnutí tranzistoru i nárůst a pokles proudu nějaký čas trvá. To vše by mělo napomoci ke snížení energetických ztrát.

## 5.5 Řízení

Pro řízení zbraně jsou použity dva mikropočítače Arduino Nano. Ty byly zvoleny především díky svým kompaktním rozměrům.

První Arduino se nachází v zadní části zbraně a stará se o vyhodnocování signálů z IR bran. Dále má za úkol vysílat spouštěcí signál. V programu tohoto Arduina je nastavena podmínka, která vypne signál v případě, že trvá podezřele dlouho. To může znamenat zaseklý náboj a zabrání dalšímu výstřelu.

Druhé Arduino je umístěno nad rukojetí. Má za úkol vyhodnotit signál ze spouště, prvního Arduina a koncového spínače, který je umístěn na podávacím zařízení a hlídá, že se nachází ve výchozí poloze. Pokud jsou všechny signály aktivní, dá pokyn podávacímu mechanismu. K tomuto Arduinu je také připojen přepínač režimů střelby. V pravé poloze vyšle jeden náboj při každém stlačení spouště nehlédě na jeho délku. V levé poloze se vysílají náboje, dokud je držena spoušť.



Obrázek 5.10: Příklad zapojení Arduina

## 5.6 Tranzistory a budiče

Ke spouštění cívek jsou využity dva typy IGBT tranzistorů. První cívku v řadě spouští tranzistor IXDN75N120, který je schopný přenášet trvalý proud až 150A. Tento tranzistor byl zvolen z důvodů dlouhého počátečního pulzu, tedy dlouho trvajícího sepnutí první cívky, které se stalo při zkouškách s vyšším proudem osudným několika slabším tranzistorům.

Pět dalších cívek spouští tranzistory IRG4PC50W, které zvládnou trvale přenášet 55A a v případě krátkého pulzu až 220A. Jejich výhodou oproti prvnímu tranzistoru je kratší spínací a vypínací zpoždění 46/120 ns. To umožní minimalizovat ztráty vyvolané spínáním a vypínáním cívek. Všechny tranzistory jsou vybaveny hliníkovými chladiči a jsou umístěny pod hlavní.

Spínací napětí U<sub>ge</sub> obou tranzistorů je 20V. K jejich spouštění je využito šesti budičů IRS2001PBF, které zesílí signál z Arduina. K jejich napájení slouží DC/DC měnič 5V/24V.

## 5.7 Akumulátor

Jak již bylo zmíněno, navrhovaná zbraň neobsahuje kondenzátory, což klade zvýšené požadavky na vlastnosti akumulátoru. Ten musí být schopen poskytnout pulz o vysokém proudu. Zároveň musí být lehký a kompaktní, aby jej bylo možné do zbraně zakomponovat. Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje Lithium–polymerový akumulátor.

Ohmovou metodou bylo zjištěno, že odpor cívky a rozvodů je přibližně 0,5Ω. Při požadavku 50A musí mít zdroj napětí o hodnotě 27,5V. Nominální napětí jednoho Li-pol článku je 3,7V. Pro dosažení požadovaného napětí je třeba akumulátor obsahující nejméně 7 článků zapojených sériově. Z důvodů dostupnosti a usnadnění výroby byly použity dva tříčlánkové akumulátory o napětí 11,1V a kapacitě 2300mAh. Celkové nominální napětí zdroje je tedy 22,2V. Kvůli nižšímu napětí bude obvodem procházet také nižší proud, a to zhruba 45A.

Pro napájení mikropočítačů a krokového motoru podávacího systému byl použit třetí Li-pol akumulátor o napětí 11,1V a kapacitě 1000mAh. [15]



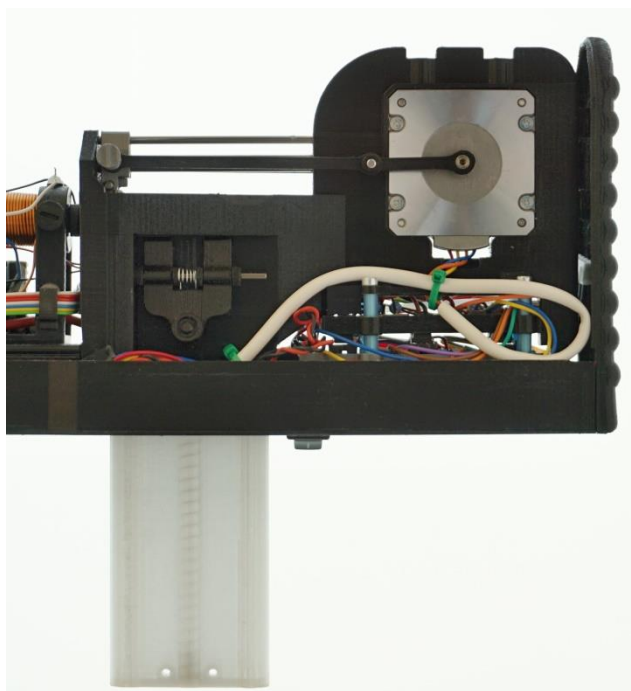
## 5.8 Podávací systém

Protože je zbraň navržena tak, aby mohla střílet dávkou, bylo třeba navrhnout dostatečně rychlý podávací systém se zásobníkem. Také bylo třeba, aby podavač udělil projektilu počáteční rychlost.

Pro tyto účely byl vytvořen klikový mechanismus poháněný krokovým motorem. Šoupě, konající lineární pohyb, se při posunu vzad sklopí a přejede náboj v zásobníku. Při pohybu vpřed se vyklopí a posune náboj do hlavně. V klidovém stavu tvoří šoupě fyzickou překážku mezi hlavní a zásobníkem, čímž se zabrání nechtěnému posunutí náboje do hlavně.

Při prvních pokusech byl mechanismus poháněn stejnosměrným motorem s převodovkou. Toto provedení umožnilo vystřelit až 8 projektilů za vteřinu. Z důvodů nutnosti přesného řízení a kompaktních rozměrů byl v prototypu využit krokový motor Sanyo Pancake 50x11mm. Při použití tohoto motoru se uvažovalo se snížením kadence na 5 ran za vteřinu. Při větším počtu nábojů v zásobníku na ně však pružina tlačila příliš velkou silou a docházelo ke ztracení kroků motoru. Z tohoto důvodu byla kadence snížena na konečné 3 výstřely za vteřinu. Do motoru bylo kvůli symetrickému rozložení sil nutné nalisovat hřídel i z druhé strany. Pro jeho řízení byl použit driver SMCB10.

Zásobník nábojů byl vytištěn z průhledného PET-G. O pohyb nábojů se stará tlačná pružina, jež je umístěna ve válcové dutině uprostřed zásobníku. Celková kapacita zásobníku je 20 nábojů.



Obrázek 5.11: Podávací mechanismus se zásobníkem

## 5.9 Tělo zbraně

Tělo zbraně bylo také vytištěno pomocí 3D tiskárny z černého PET-G. Tento materiál byl zvolen kvůli snadnému provádění dodatečných úprav, například vyřezávání závitů pro šrouby. Nevýhodou použitého materiálu je vznik drobných deformací u větších dílů. Zbraň tvoří kostra a násuvné moduly.

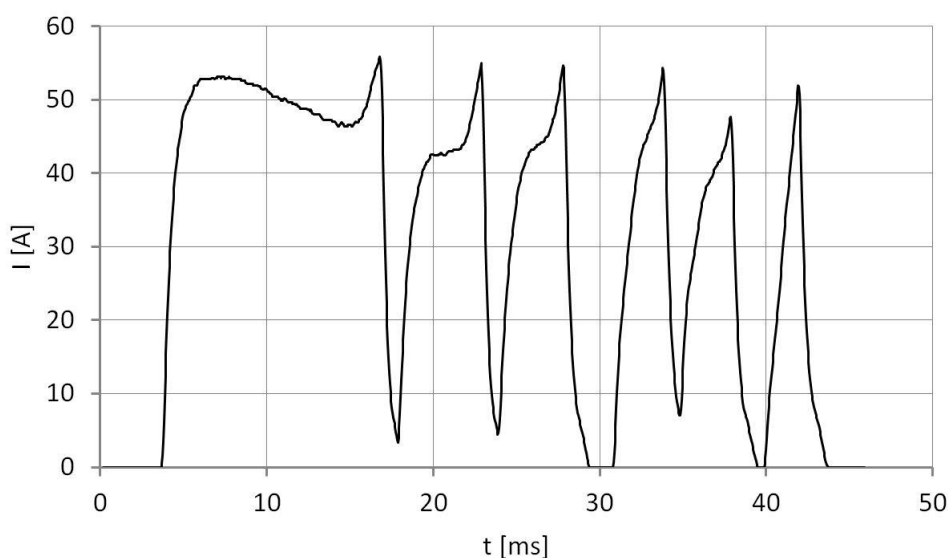
Kostra zbraně je tvořena třemi díly, které jsou dohromady staženy závitovou tyčí. I když se zbraň při manipulaci lehce prohýbá, je dostatečně pevná a na její funkci to nemá vliv. Na kostře se nachází podávací systém a Arduino s budiči pro spouštění cívek.

Násuvnými moduly jsou pak všechny kryty a hlaveň. Tu je možné po odpojení všech vodičů a vyjmutí IR bran vysunout. Horní kryty lze lehce vysunout nebo odšroubovat. Spodní kryt obsahující akumulátory lze rovněž snadno vyjmout směrem vpřed. Spodní kryt s rukojetí je také navržen pro snadné vyjmutí. Kvůli velkému počtu vodičů, které ji spojují se zařízeními na kostře, je to ale problematické.

## 6 Porovnání výpočtového modelu a prototypu

### 6.1 Měření proudu

Pro změření proudu, procházejícího cívkami, byl využit bočník a osciloskop DS211. Naměřená hodnota proudu se vložila do výpočtového modelu a vykreslil se průběh rychlosti projektilu v závislosti na čase. Z této závislosti je možné vyčíst, jakou rychlost by měl mít projektil po průletu každou z cívek.



Obrázek 6.1: Průběh proudu

Z grafu (Obrázek 6.1) lze vyčíst, že se proudové špičky dostávají až na hodnotu 55 A. Střední hodnota proudu je však nižší. Pro simulaci bude použita hodnota 45 A.

## 6.2 Měření rychlosti projektilu

Průběh skutečné rychlosti v závislosti na čase bylo možné změřit tak, že se provedlo 6 zkušebních výstřelů. Po každém z výstřelů byla připojena jedna cívka. První pokus tedy proběhl pouze s jednou cívkou, poslední pak se všemi cívkami. Každou cívku je možné snadno deaktivovat pouhým přerušením řídicího signálu do tranzistoru. Rychlost projektilů byla měřena pomocí rychloběžné kamery s frekvencí 120 snímků za vteřinu na dráze 2 metry. Z počtu snímků, které kamera pořídila mezi počátkem a koncem dráhy, bylo možné určit čas průletu. Výsledky pokusu byly zaneseny do tabulky 6.1.

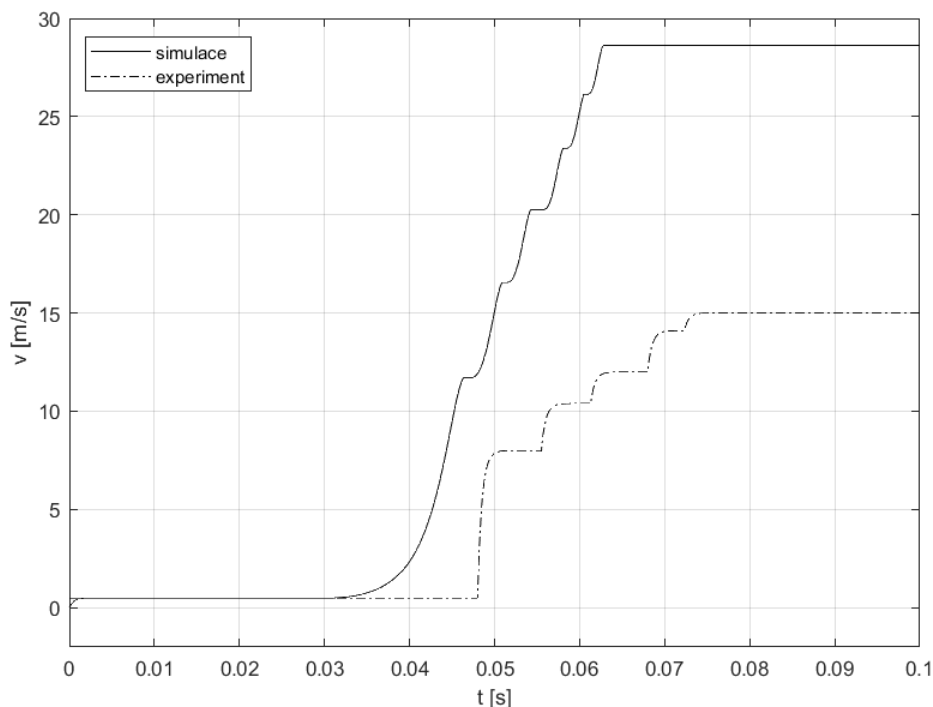
Tabulka 6.1: Skutečná rychlost v závislosti na počtu cívek

Počet cívek	počet snímků	čas průletu [s]	rychlost střely [m/s]
1	30	0,25	8,0
2	23	0,19	10,4
3	20	0,17	12,0
4	17	0,14	14,1
5	16	0,13	15,0
6	16	0,13	15,0

Z tabulky (6.1) je patrné, že u poslední cívky již nedošlo k nárůstu rychlosti. To může být způsobeno nedostatečným rozlišením použité metody měření rychlosti, nebo byl přírůstek síly stejně velký, jako ztrátové síly, které vznikly při aktivaci cívky.

## 6.3 Srovnání

Výsledky výpočtového modelu a zkušební střelby byly vneseny do grafu (Obrázek 6.2).



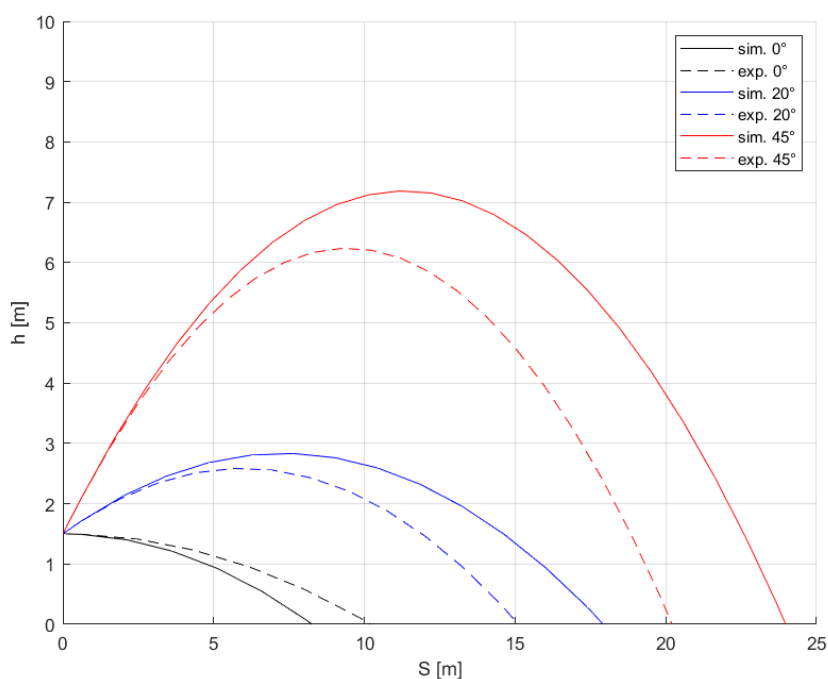
Obrázek 6.2: Srovnání teoretického a skutečného průběhu rychlostí

Z grafu (Obrázek 6.2) je patrné, že reálná rychlost střely je značně nižší, než jaká je předpokládána výpočtovým modelem. Rozdíl tkví ve všech ztrátových silách, které nejsou do modelu započítány, tedy třecí síle mezi hlavní a projektil, odporové síle prostředí, hysterezním a vířivým ztrátám a ztrátám vzniklým nedokonalým spínáním. Některé z těchto odporových sil je možné snadno vyčíslit. Ztráty hysterezní a ztráty vzniklé vířivými proudy se však nedají spolehlivě určit, vzhledem k neznámému vlastnostem materiálu projektilu a obtížnému analogickému řešení.

Při dalším testu bylo provedeno několik zkušebních výstřelů pro různé úhly náměru a byl měřen dostřel. Výsledky testu jsou uvedeny v tabulce 6.2. Tyto výsledky byly vloženy do simulace trajektorie a porovnány s teoretickým dostřelem pro rychlost 15m/s.

Tabulka 6.2: Dostřel při různých úhlech náměru

Úhel náměru [°]	Dostřel [m]
0	10,2
10	11,1
20	15,1
30	18,3
45	20,2
60	19,1



Obrázek 6.3: Srovnání simulovaných a skutečných trajektorií

Na obrázku 6.3 je vyobrazeno srovnání simulovaných a změřených trajektorií pro 0°, 20° a 45° náměru. Mezi předpokládanými a skutečnými dostřely jsou patrné rozdíly. Ty jsou s největší pravděpodobností způsobeny tím, že při namíření hlavně směrem vzhůru, je hlavní rychlost nižší než při nulovém úhlu náměru.

## 6.4 Stanovení účinnosti

Porovnáním kinetické energie střely při maximální teoretické rychlosti a kinetické energie střely při rychlosti změřené experimentálně, lze stanovit celková účinnost zbraně.

Kinetická energie střely je dána vzorcem

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (6.1)$$

kde  $m$  je hmotnost projektilu, tedy 10g, a  $v$  značí jeho rychlost. Výsledné hodnoty energií při výstřelu z jedné až šesti cívek jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3: Stanovení účinnosti

Počet cívek	Ek sim [J]	Ek exp [J]	$\eta$ [%]
1	0,720	0,320	44,4
2	1,361	0,541	39,7
3	2,101	0,720	34,3
4	2,761	0,994	36,0
5	3,380	1,125	33,3
6	3,920	1,125	28,7

## 7 Závěr

V této práci jsou vysvětleny principy fungování Gaussovy pušky, je zde popsána historie jejího vývoje a uvedeno několik prací, které se věnovaly návrhům různých typů a konstrukcí tohoto zařízení. Dále je zde analyzována fyzikální podstata, na které zbraň funguje, tedy jak dochází k přeměně elektrické energie na kinetickou energii střely. Součástí kapitoly je i popis energetických ztrát, ke kterým dochází během výstřelu a při pohybu projektilu v daném prostředí.

V další části práce jsou sestaveny pohybové rovnice pro pohyb projektilu během výstřelu a pro pohyb v prostředí po výletu z hlavně. Pro uvedené rovnice jsou vytvořeny simulace v prostředí Matlab Simulink.

Kapitola 5 se věnuje návrhům všech důležitých komponent. Jsou zde rozebrány materiály, které jsou vhodné pro výrobu projektilů a předpokládané ideální tvary projektilů. Důležitou částí je podkapitola 5.2, kde je popsán návrh odpalovací cívky. Podkapitola obsahuje dvě metody, pomocí kterých se dá určit tvar křivky průběhu síly v závislosti na poloze. Po dosazení do rovnice pro výpočet síly magnetického pole solenoidu lze určit sílu, kterou působí odpalovací cívka na projektil. S použitím Newtonova druhého pohybového zákona lze určit průběh a velikost zrychlení projektilu, čímž je možné simulovat jeho pohyb během výstřelu. S pomocí simulace je možné určit optimální množství odpalovacích cívek. Dále je zevrubně popsána konstrukce prototypu, a to včetně metod výroby, použitých materiálů a komponent.

Kapitola 6 obsahuje porovnání zkušebních výstřelů s výsledky získanými pomocí simulací. Při prvním výstřelu byl změřen proud procházející cívkami. Tato hodnota proudu byla použita v simulaci pro výpočet teoretické úst'ové rychlosti projektilu. Následně bylo provedeno šest zkušebních výstřelů s různým počtem aktivních cívek. Výsledné rychlosti určené pro každou z cívek byly následně použity při výpočtu kinetické energie projektilu. Z podílů kinetických energií vypočtených z experimentálních a simulovaných rychlostí byla určena účinnost pro konfiguraci s daným počtem cívek. Celková účinnost experimentálního prototypu byla stanovena na 28,7%. Při stanovení teoretické rychlosti projektilu mohlo dojít k zanesení chyb během určování závislosti průběhu síly na poloze. Skutečná účinnost se proto může lišit o jednotky procent.

Důvodem takto nízké účinnosti jsou především ztráty spojené s indukováním vířivých proudů, hysterezní ztráty a také nepřesné spínání cívek. Při návrhu výpočtového modelu se také počítalo s tím, že elektrický proud bude převážně konstantní. Tento předpoklad se však při měření nepotvrdil.

Maximální úst'ová rychlost projektilu 15m/s ani kinetická energie projektilu 1,125J, které byly změřeny a určeny při experimentech, nejsou nijak oslnivé. Pro bojové použití je tato zbraň nevhodná. Za tímto účelem však konstruována nebyla. Jedná se spíše o technologický demonstrátor, při jehož konstrukci se dají uplatnit nabyté zkušenosti z oblasti mechaniky a elektrotechniky. Prototyp funguje vcelku spolehlivě. Pouze v případech, kdy je plný zásobník, může dojít k zaseknutí podavače. To se dá snadno vyřešit jeho manuálním posunutím.



# Seznam použitých zdrojů

- [1] Railgun. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>
- [2] Elektromagnetické dělo. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické\\_dělo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_dělo)
- [3] Gaussova puška. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Gaussova\\_puška](https://cs.wikipedia.org/wiki/Gaussova_puška)
- [4] BIRKELAND, Kristian. Electromagnetic gun. *Google Patents* [online]. 1904 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US754637A/en>
- [5] Electric Machine Guns and Coilguns. *Stolen history* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.stolenhistory.org/threads/electric-machine-guns-coilguns-and-death-ray-guns-of-yesteryear.1517/>
- [6] RODRIGO, Eksith. A video game style electromagnetic gun (from 1934). *WorldPress* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://eksith.wordpress.com/tag/virgil-rigsby/>
- [7] KOVAŘÍK, Martin. *Experimentální elektromagnetické vystřelovací zařízení s více stupni* [online]. 2018 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108639?zp\\_id=108639](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108639?zp_id=108639) . VUT Brno.
- [8] KADLECOVÁ, Lucie. *Elektromagnetické výkonové aktuátory* [online]. 2018 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/112909> VUT Brno.
- [9] MURRAY, Jason. Gauss Machine Gun. *Delta-V Engineering* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <http://www.deltaveng.com/>
- [10] Halliday David, Resnick Robert, Walker Jearl: *Fyzika 2*. Brno: VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [11] Permeability (electromagnetism). *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [12] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN 9788020010049.
- [13] SAJDL, Jan. Aerodynamika. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/aerodynamika/>
- [14] BERGER, Ralph. How would you calculate a bullet's velocity reduction due to drag? *Quora* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.quora.com/How-would-you-calculate-a-bullets-velocity-reduction-due-to-drag>

[15] Lithium-polymerový akumulátor. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový\\_akumulátor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-polymerový_akumulátor)

# Seznam příloh

## **Příloha A: Fotodokumentace**

A. 1: Výroba vinutí.....	I
A. 2: Zkušební zapojení.....	I
A. 3: Vlisování druhé hřídele .....	II
A. 4: Klikový mechanismus (pohled shora) .....	II
A. 5: Tisk součástí .....	III
A. 6: Kostra a spodní část zbraně .....	III
A. 7: Zbraň bez horních krytů .....	IV
A. 8: Kompletní zbraň .....	IV

## **Příloha B: Matlab Simulink – simulace výstřelu**

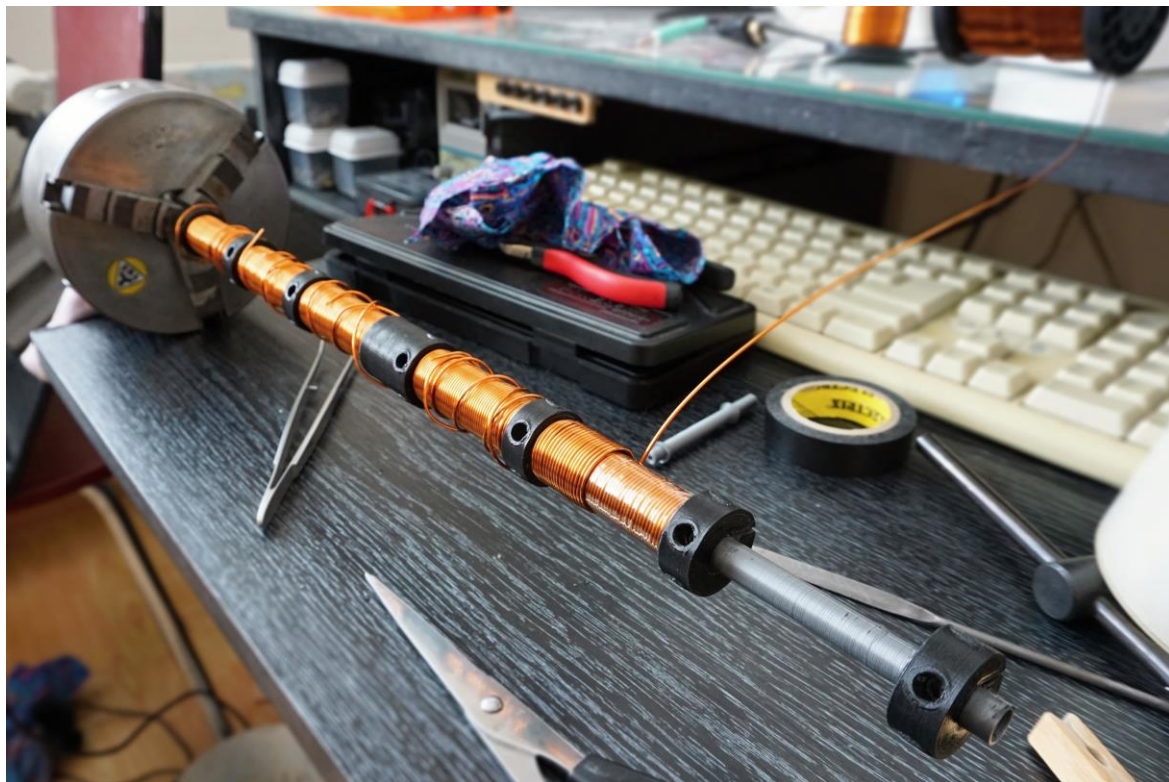
## **Příloha C: Matlab Simulink – simulace trajektorie**

## **Příloha D: Výsledky měření indukčnosti a síly solenoidu**

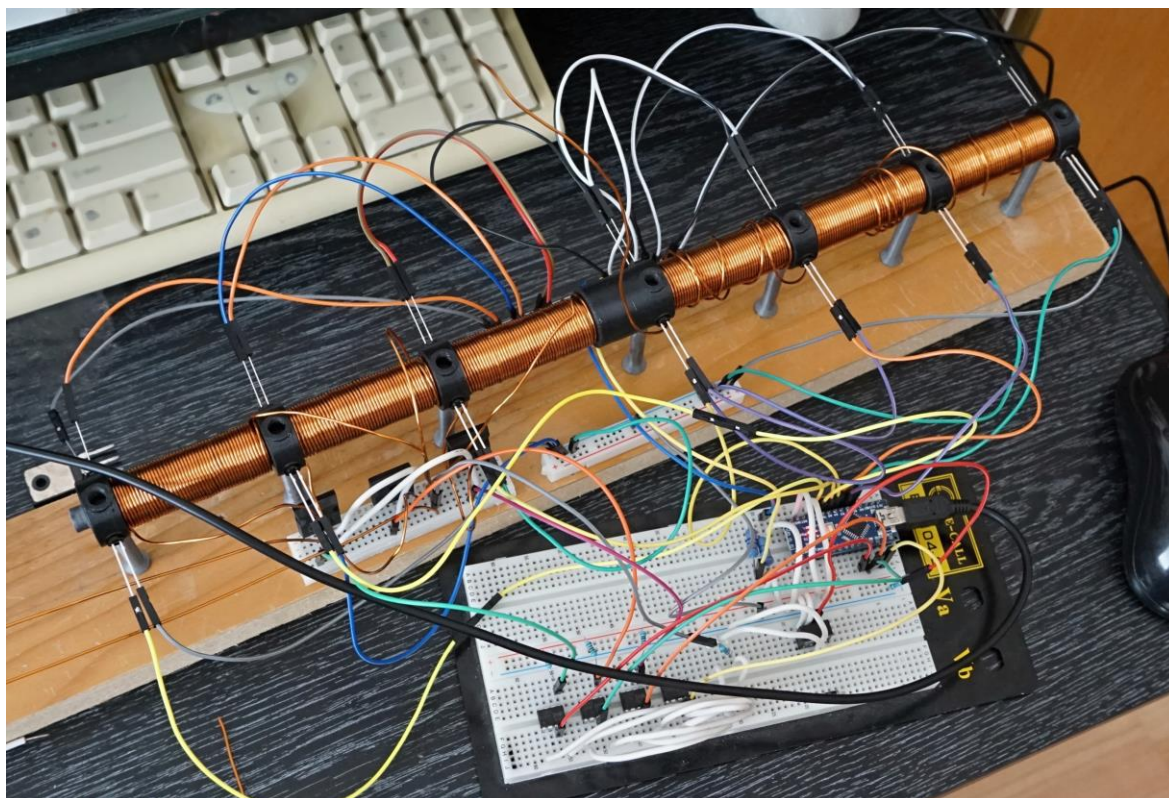
## **Příloha E: Schéma zapojení**

## Příloha A Fotodokumentace

### A. 1: Výroba vinutí



### A. 2: Zkušební zapojení

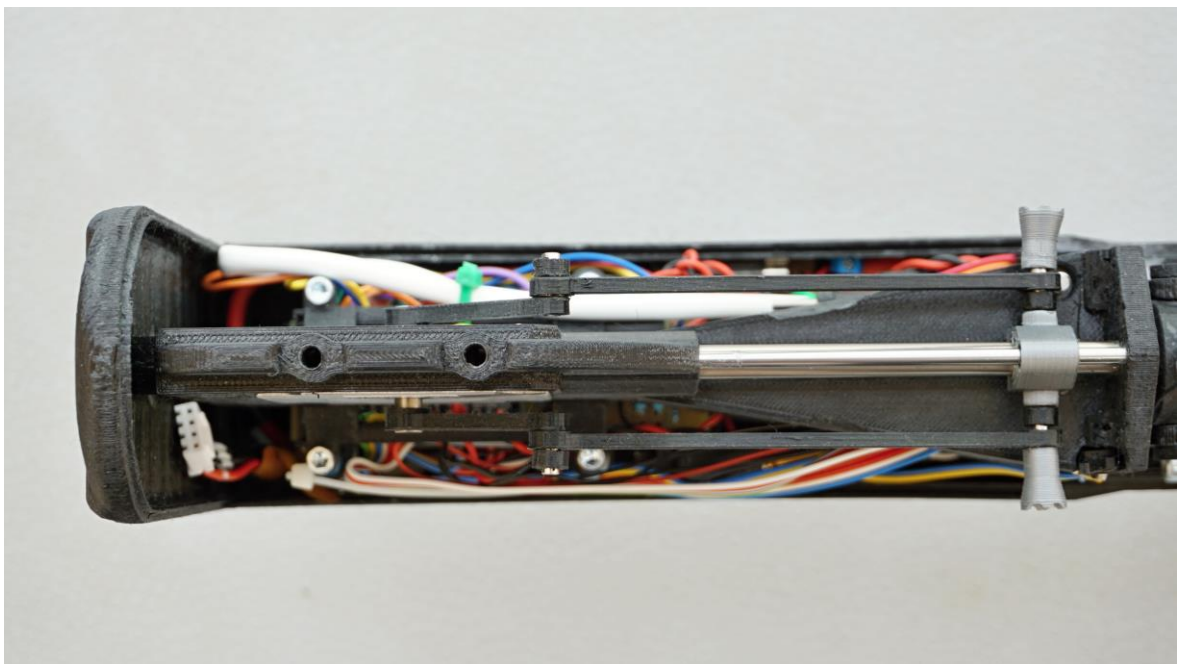




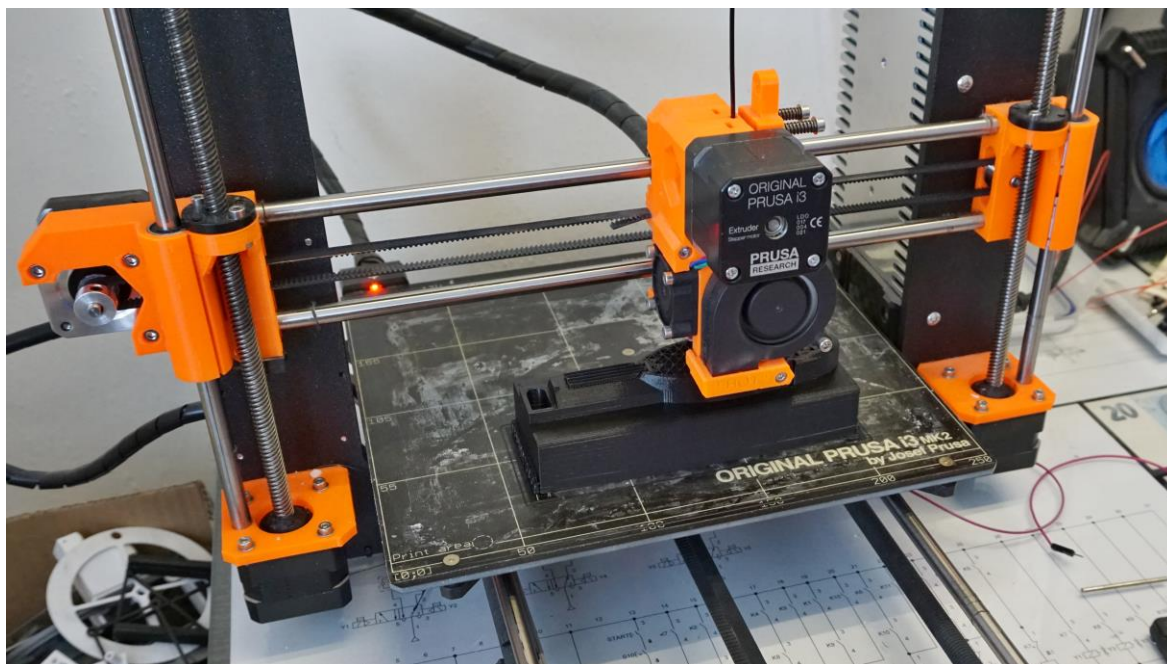
A. 3: Vlisování druhé hřídele



A. 4: Klikový mechanismus (pohled shora)



A. 5: Tisk součástí



A. 6: Kostra a spodní část zbraně





A. 7: Zbraň bez horních krytů



A. 8: Kompletní zbraň

